



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »
www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

RAPPORT

CONSOMMATIONS ET PERFORMANCES RÉELLES DES POMPES À CHALEUR

JUIN 2014

ÉDITO

Le Grenelle Environnement a fixé pour les bâtiments neufs et existants des objectifs ambitieux en matière d'économie et de production d'énergie. Le secteur du bâtiment est engagé dans une mutation de très grande ampleur qui l'oblige à une qualité de réalisation fondée sur de nouvelles règles de construction.

Le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a pour mission, à la demande des Pouvoirs Publics, d'accompagner les quelque 370 000 entreprises et artisans du secteur du bâtiment et l'ensemble des acteurs de la filière dans la réalisation de ces objectifs.

Sous l'impulsion de la CAPEB et de la FFB, de l'AQC, de la COPREC Construction et du CSTB, les acteurs de la construction se sont rassemblés pour définir collectivement ce programme. Financé dans le cadre du dispositif des certificats d'économies d'énergie grâce à des contributions importantes d'EDF (15 millions d'euros) et de GDF SUEZ (5 millions d'euros), ce programme vise, en particulier, à mettre à jour les règles de l'art en vigueur aujourd'hui et à en proposer de nouvelles, notamment pour ce qui concerne les travaux de rénovation. Ces nouveaux textes de référence destinés à alimenter le processus normatif classique seront opérationnels et reconnus par les assureurs dès leur approbation ; ils serviront aussi à l'établissement de manuels de formation.

Le succès du programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » repose sur un vaste effort de formation initiale et continue afin de renforcer la compétence des entreprises et artisans sur ces nouvelles techniques et ces nouvelles façons de faire. Dotées des outils nécessaires, les organisations professionnelles auront à cœur d'aider et d'inciter à la formation de tous.

Les professionnels ont besoin rapidement de ces outils et « règles du jeu » pour « réussir » le Grenelle Environnement.

Alain MAUGARD

Président du Comité de pilotage du Programme
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »
Président de QUALIBAT



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

AVANT- PROPOS

Afin de répondre au besoin d'accompagnement des professionnels du bâtiment pour atteindre les objectifs ambitieux du Grenelle Environnement, le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a prévu d'élaborer les documents suivants :

Les Recommandations Professionnelles « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques de référence, préfigurant un avant-projet NF DTU, sur une solution technique clé améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur vocation est d'alimenter soit la révision d'un NF DTU aujourd'hui en vigueur, soit la rédaction d'un nouveau NF DTU. Ces nouveaux textes de référence seront reconnus par les assureurs dès leur approbation.

Les Guides « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques sur une solution technique innovante améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur objectif est de donner aux professionnels de la filière les règles à suivre pour assurer une bonne conception, ainsi qu'une bonne mise en œuvre et réaliser une maintenance de la solution technique considérée. Ils présentent les conditions techniques minimales à respecter.

Les Calepins de chantier « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des mémentos destinés aux personnels de chantier, qui illustrent les bonnes pratiques d'exécution et les dispositions essentielles des Recommandations Professionnelles et des Guides « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 ».

Les Rapports « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » présentent les résultats soit d'une étude conduite dans le cadre du programme, soit d'essais réalisés pour mener à bien la rédaction de Recommandations Professionnelles ou de Guides.

Les Recommandations Pédagogiques « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents destinés à alimenter la révision des référentiels de formation continue et initiale. Elles se basent sur les éléments nouveaux et/ou essentiels contenus dans les Recommandations Professionnelles ou Guides produits par le programme.

L'ensemble des productions du programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » est mis gratuitement à disposition des acteurs de la filière sur le site Internet du programme : <http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr>

Sommaire

Introduction 5

1 - Données du module de PAC 7

- 1.1. • Identification des postes de consommation pour les quatre sites suivis 8
- 1.2. • Sensibilité du modèle vis-à-vis des données techniques de la PAC 9
- 1.3. • Sensibilité de la conception hydraulique 19
- 1.4. • Sensibilité du modèle vis-à-vis des paramètres liés à l'exploitation 22
- 1.5. • Importance du dimensionnement 24
- 1.6. • Evolution des consommations en fonction du climat 26

2 - Confrontation du modèle de pompe à chaleur à des relevés 27

- 2.1. • Identification de niveaux d'informations 27
- 2.2. • Informations requises en phase de conception 31
- 2.3. • Informations requises en phase d'exploitation 34
- 2.4. • Vers une correction climatique simplifiée 34

3 - Limites et perspectives de l'étude 37

Références 38

Annexes 39

- Annexe 1 : modèle mathématique du module de pompe à chaleur 40
- Annexe 2 : présentation synthétique des sites 46

Introduction



Les installations de pompes à chaleur sont des systèmes plus complexes que les installations traditionnelles de chauffage et la gamme des configurations possibles est large.

De plus, la conception et le dimensionnement des installations de pompes à chaleur influent fortement la performance obtenue.

Enfin, pour les pompes à chaleur, la performance saisonnière (et donc l'économie effective) peut s'éloigner de la performance nominale.

Pour les raisons évoquées ci-dessus, les professionnels ont besoin de disposer d'outils de calcul fiables leur permettant de :

- Concevoir et dimensionner au mieux leurs installations,
- Prédire avec une précision acceptable l'économie d'énergie que devrait réaliser le client,
- Et, demain, suivre la consommation de ces installations pour tendre vers une garantie de résultats.

Aucun des outils de calcul disponibles sur le marché ne permet de répondre parfaitement à l'ensemble de ces critères.

Il convient donc de définir le cahier des charges d'un module de calcul des installations de pompes à chaleur. Ce cahier des charges doit inclure :

- Un modèle mathématique pouvant être utilisé dans les différents domaines d'application visés (conception, prévision, suivi dans le temps, recalage de la prévision).
- La définition des entrées et paramètres nécessaires à l'estimation de la consommation électrique de l'installation à partir d'un besoin thermique donné. Plusieurs niveaux de simplification de ces entrées et paramètres sont étudiés.



Un modèle mathématique, inspiré de la norme NF EN 15316-4-2, est présenté en [Annexe 1]. Ce modèle est utilisé pour effectuer les analyses contenues dans ce rapport.

Des analyses de sensibilité, menées sur quatre sites ayant fait l'objet d'un suivi instrumenté, ont permis d'identifier les entrées et paramètres impactant le plus le calcul de la consommation de chacun des postes d'un système intégrant une pompe à chaleur.

Enfin, les enseignements des précédentes analyses sont utilisés pour définir différents niveaux d'informations susceptibles d'être utilisés lors d'un projet d'installation d'une pompe à chaleur.

La capacité des outils à bien prédire les consommations des installations de pompes à chaleur dépend non seulement de la façon dont est modélisée cette « brique » mais également de la façon dont est évalué le besoin thermique. D'autres travaux menés dans le programme Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 s'intéressant à la partie « évaluation des besoins thermiques », cette étude se concentre exclusivement sur la partie « pompe à chaleur ».

Le cadre de cette étude est limité aux pompes à chaleur air/eau.

Cette étude a été menée par le COSTIC (Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques).

Données du module de PAC



Les éléments présentés dans cette partie étudient l'impact unitaire des principales entrées du modèle.

Cette partie inclut une analyse de la sensibilité de certaines de ces informations à travers la modélisation des installations de quatre sites suivis sur une année de mesures. Ces suivis ont été réalisés avec le soutien de l'ADEME. Ils permettent de fournir des données pour le module de calcul de pompe à chaleur. Certaines de ces données sont invariantes dans cette partie, en particulier :

- Le besoin thermique mesuré de l'installation ;
- La température extérieure mesurée.

D'autres données, propres à chaque site, sont utilisées pour mener à bien les analyses de sensibilité, par exemple :

- Les données nominales de la pompe à chaleur utilisée ;
- La loi d'eau mesurée...

Ces analyses permettent de cibler différents types d'information mais aussi de formaliser certains aspects essentiels pour la création d'un outil d'évaluation des consommations d'une pompe à chaleur.

Le tableau de l'[Annexe 2] synthétise les différentes caractéristiques des quatre sites suivis pendant une année. Ces quatre sites servent d'appui aux analyses de cette partie et celles menées à la partie 2.

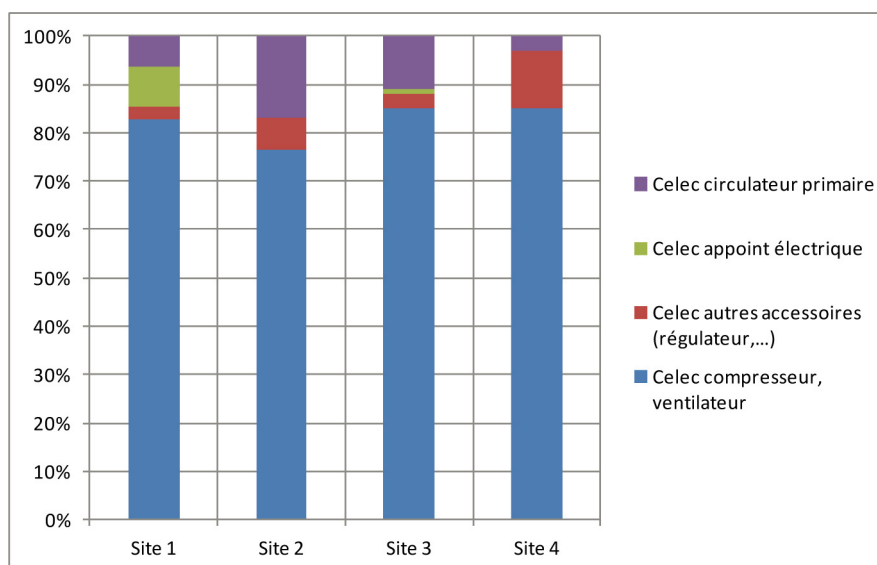
1.1. • Identification des postes de consommation pour les quatre sites suivis

A partir des mesures effectuées, une répartition des consommations électriques par poste a été établie.

Ces répartitions sont présentées à la (Figure 1). Le circulateur secondaire n'est pas intégré à cette répartition.

Par ordre décroissant de la part de consommation, il y a en moyenne la distribution suivante :

- Le compresseur et le ventilateur (en moyenne 83%) ;
- Le circulateur du réseau primaire (en moyenne 8%) ;
- Le régulateur et la résistance de carter (en moyenne 6%) ;
- L'appoint électrique (en moyenne 3%).



▲ Figure 1 : Répartition annuelle des postes pour les 4 sites

A retenir

Même si les auxiliaires de la pompe à chaleur (circulateurs, appoint électrique, régulateur...) ne constituent pas la majorité de la consommation du système, il peut être nécessaire de connaître avec une précision suffisante ces différents postes.

Le module mathématique du système, présenté à l'[Annexe 1], intégrant une pompe à chaleur permet d'estimer les consommations :

- De la pompe à chaleur en incluant ces accessoires (régulateur, résistance de carter...) ;
- De l'appoint électrique ;
- D'un circulateur à vitesse fixe.



Nota : Dans ces études de cas, la part de consommation de l'appoint électrique est relativement faible du fait du dimensionnement des pompes à chaleur (voir annexe 2).

Pour le site n°4, le circulateur est à vitesse variable, ce qui explique pourquoi la part de consommation de ce poste est faible devant les autres postes.

1.2. • Sensibilité du modèle vis-à-vis des données techniques de la PAC

L'impact des données techniques de la pompe à chaleur utilisée dans le modèle mathématique sur la prévision de consommation est examiné à travers :

- La connaissance plus ou moins détaillée de couples performance / puissance calorifique disponible pour différents points d'essais,
- Le type de modulation de puissance (tout ou rien, multi-étagé, variation de vitesse)

Cet impact permet de connaître la sensibilité de ces données sur la prévision et donc de juger de la pertinence des données à intégrer dans l'interface.

1.2.1. • Données nominales de la PAC

Les données de performances et de puissances calorifiques à intégrer peuvent être renseignées de manière simplifiée à partir d'un point d'essai pour les conditions d'essais de la norme NF EN 14511 ou intégrées de manière plus détaillée : de 1 à 25 points d'essai pour le référentiel NF PAC.

Commentaire

Pour une pompe à chaleur air /eau, la puissance électrique mesurée dans les conditions d'essais de la norme NF EN 14511 intègre :

- La puissance du compresseur ;
- La puissance du ventilateur ;
- La puissance du régulateur, résistance de carter, et capteurs intégrés à la pompe à chaleur ;
- Une partie de la puissance du circulateur.

Notons que, pour la plupart des pompes à chaleur certifiées selon le référentiel NF PAC, la totalité des points d'essais n'est aujourd'hui pas disponible.

A retenir

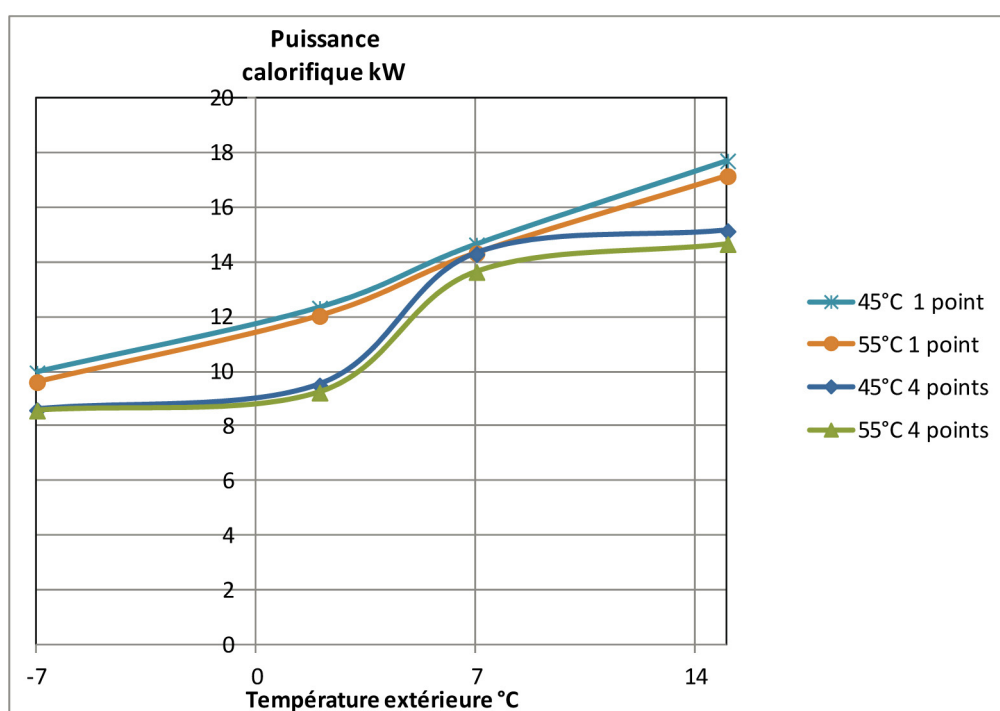
Les principales caractéristiques de la pompe à chaleur peuvent être intégrées de manière succincte (1 point d'essai) ou détaillée (jusqu'à 25 points d'essai).

Pour illustrer l'impact du paramétrage des propriétés techniques à pleine charge de la pompe à chaleur, deux calculs sont menés pour chacun des sites :

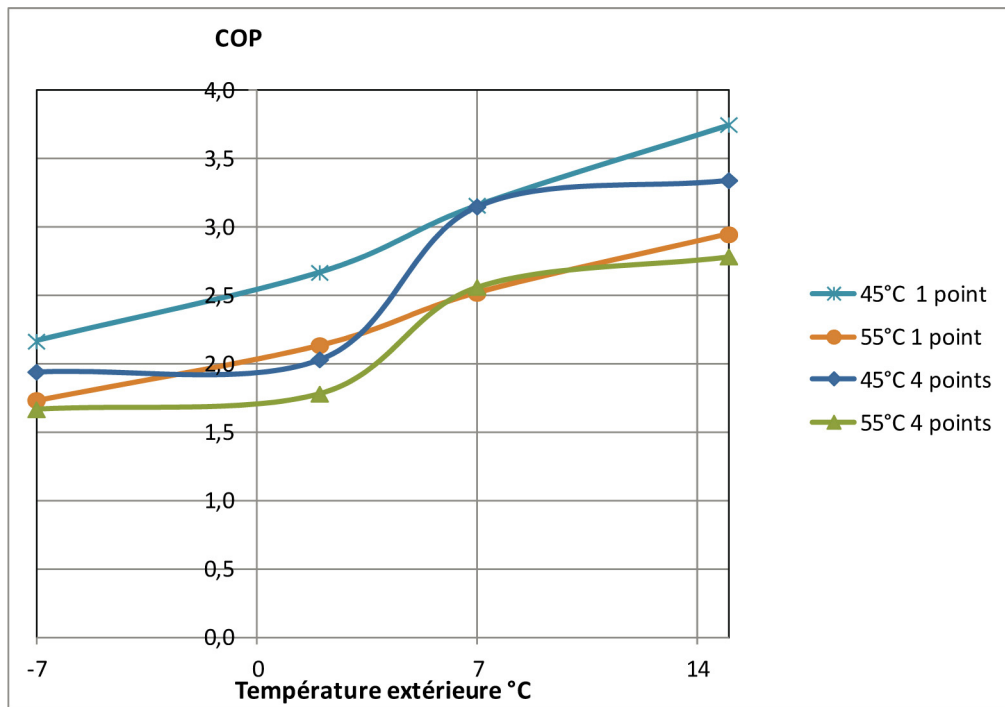
- Un paramétrage avec les données du fabricant pour 8 points de fonctionnement (4 températures extérieures pour 2 températures de départ d'eau) ;
- Un paramétrage à partir d'un unique point de fonctionnement à 7°C de température extérieure et 35°C sur la température de départ d'eau.

Dans le cas d'un unique point d'essais, il est nécessaire d'utiliser des corrélations liant la température extérieure et la température d'eau pour d'autres conditions de fonctionnement. Une interpolation linéaire est ensuite utilisée [Annexe 1].

Ces deux types de paramétrage sont illustrés à la (Figure 2) et à la (Figure 3).



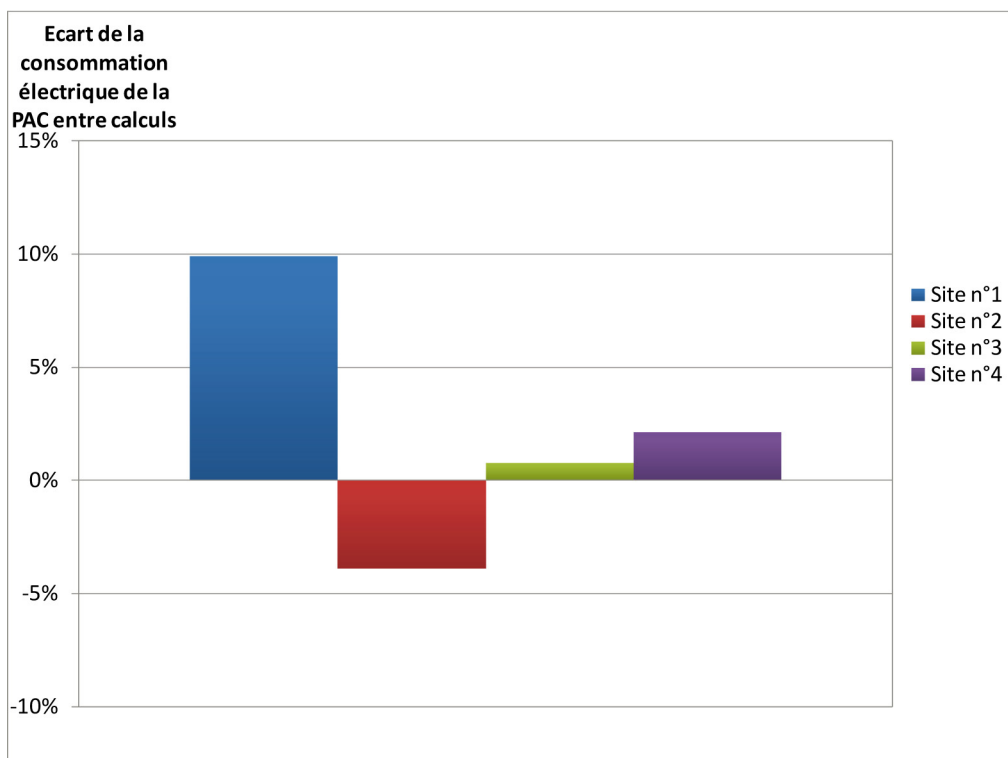
▲ Figure 2 : Comparaison de la puissance calorifique à pleine charge pour le site n°1



▲ Figure 3 : Comparaison des COP à pleine charge pour le site n°1

L'impact du type de paramétrage (1 point ou 8 points) sur la consommation annuelle de la pompe à chaleur est donné à la (Figure 4). Sur cette figure, lorsque l'écart est positif, alors la consommation estimée avec un point de fonctionnement est supérieure à celle estimée avec les huit points de fonctionnement.

Les écarts entre les différents calculs sont faibles (au maximum de l'ordre de 10%).



▲ Figure 4 : Impact relatif de la performance à pleine charge sur les calculs

A retenir

La méthode de paramétrage de la pompe à chaleur à pleine charge a un impact limité sur la consommation annuelle de la pompe à chaleur. Le modèle proposé permet néanmoins d'utiliser un ou huit points de la documentation du fabricant pour paramétrer la performance à pleine charge de la pompe à chaleur.

1.2.2. • Régulation de puissance de la pompe à chaleur

La régulation du compresseur impacte la consommation annuelle de la pompe à chaleur. En effet, la performance d'une pompe à chaleur évolue en fonction du taux de charge de la machine.

Or, la performance à charge partielle des pompes à chaleur n'est pas indiquée dans les notices techniques des constructeurs ; seul le type de contrôle utilisé est disponible.

Pour une pompe à chaleur, il peut exister deux plages de fonctionnement se différenciant par leur mode de régulation :

- Une plage de fonctionnement en tout ou rien ;
- Une plage de fonctionnement continue dans la plage de modulation de vitesse du compresseur : ce mode de fonctionnement n'est possible que pour les pompes à chaleur disposant d'un variateur de vitesse sur le compresseur.

Dans le cas d'une pompe à chaleur disposant de deux compresseurs fonctionnant en tout ou rien, le deuxième compresseur est démarré lorsque le premier ne suffit pas à subvenir au besoin de l'installation.

Le modèle mathématique permet ainsi de modéliser :

- Les pompes à chaleur à compresseur contrôlé en tout ou rien ;
- Les pompes à chaleur à compresseurs à vitesse variable ;
- Les pompes à chaleur à 2 compresseurs en tout ou rien.

Dans la plage de fonctionnement en tout ou rien, il est également nécessaire de modéliser deux modes de fonctionnement lorsque :

- Le besoin thermique horaire est non nul : la PAC peut parfois être à l'arrêt pour moduler la charge moyenne, mais le fonctionnement correspond à un mode actif ;
- Le besoin thermique est nul : la PAC est dans un mode de « veille passive ».

Tous ces aspects sont intégrés au modèle mathématique à travers diverses données. Des analyses de sensibilité sont menées ci-dessous pour cibler les paramètres les plus impactant et qui donc devrait être renseignés pour chaque machine.

Cas de la plage de modulation en tout ou rien : mode actif

Quand la pompe à chaleur est à l'arrêt en mode actif, la pompe à chaleur génère des consommations électriques du fait des accessoires (régulateur et résistance de carter).

Dès que la pompe à chaleur fonctionne en tout ou rien, le modèle mathématique de performance de la PAC intègre la consommation de ces accessoires par le coefficient de dégradation C_c .

Le paramètre C_c est difficilement mesurable in-situ sans la mise en place d'une instrumentation spécifique.

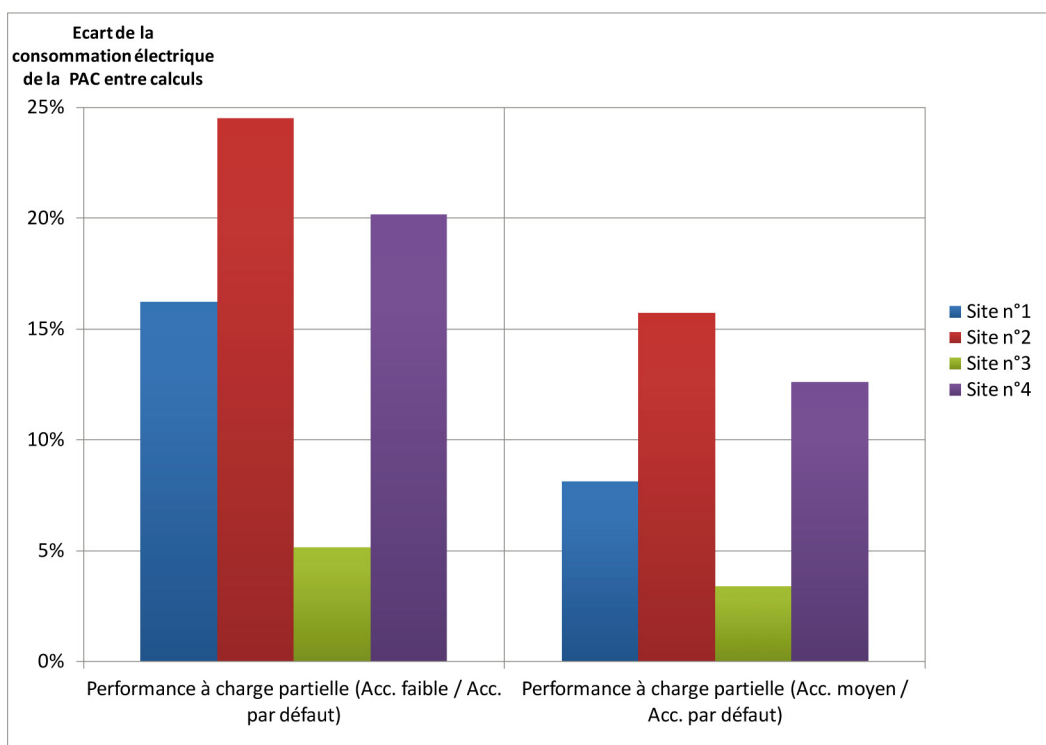
Le coefficient C_c peut être pris par défaut égal à 90% dans la norme NF EN 14825.

Pour illustrer l'impact du coefficient C_c sur la consommation, plusieurs valeurs sont testées :

- « Acc par défaut » (impact des accessoires pris par défaut): le coefficient C_c est pris égal à 90% ;
- « Acc. faible » (impact des accessoires faible): le coefficient C_c est égal à 98% ;
- « Acc. moyen » (impact des accessoires moyen) : le coefficient C_c est égal à 95%.

Autrement dit, plus le coefficient de dégradation est important plus l'impact des accessoires sur la performance est faible.

Les écarts entre le calcul avec un coefficient C_c pris à 90% et les deux autres valeurs sont donnés à la (Figure 5).



▲ Figure 5 : Impact de la consommation électrique de la puissance des accessoires

Sur cette figure, l'écart est toujours positif car la consommation de la pompe à chaleur en mode actif est toujours plus élevée avec le coefficient de dégradation C_c le plus faible.

Il ressort de cette analyse que ce coefficient impacte fortement les calculs.

A retenir

La consommation des accessoires de la pompe à chaleur (régulateur et résistance de carter) peut avoir un impact important sur la consommation annuelle de la PAC. Une valeur du coefficient de dégradation C_c doit donc être correctement renseignée pour obtenir une estimation de la consommation de la pompe à chaleur satisfaisante.

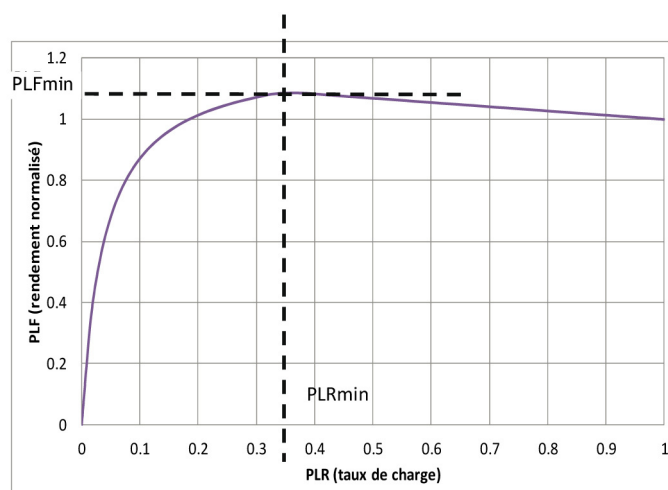
Spécificités d'un compresseur à vitesse variable

Pour la plage de variation de vitesse du compresseur (pour les pompes à chaleur étant équipées d'un moteur à vitesse variable), les paramètres du modèle pour la plage de modulation de puissance sont les suivants :

- Le taux de charge thermique minimal (PLRmin) ¹ ;
- Le facteur de correction du COP pour ce taux de charge minimal (PLFmin) ².

Ces paramètres doivent être renseignés dans le modèle mathématique proposé.

L'illustration de ces deux valeurs est donnée à la (Figure 6).



▲ Figure 6 : Evolution du facteur de correction du COP pour un compresseur à vitesse variable

■ 1 Le taux de charge thermique (Part Load Ratio en anglais) est défini à l'annexe 1 : il représente le ratio entre la puissance thermique utilisée et la puissance thermique à pleine charge. En dessous du taux de charge minimal, la PAC fonctionne en tout ou rien.

■ 2 Le facteur de correction du COP (Part Load Factor en anglais) est défini à l'annexe 1 : il représente le ratio entre le COP à charge partielle et le COP à pleine charge.



Ces paramètres sont très difficilement accessibles sur le terrain (il faudrait une instrumentation et un suivi approfondis). Par ailleurs, ces paramètres ne sont généralement pas donnés par les fabricants, malgré une mesure possible selon NF EN 14825.

Une analyse de sensibilité sur ces paramètres est proposée ci-dessous.

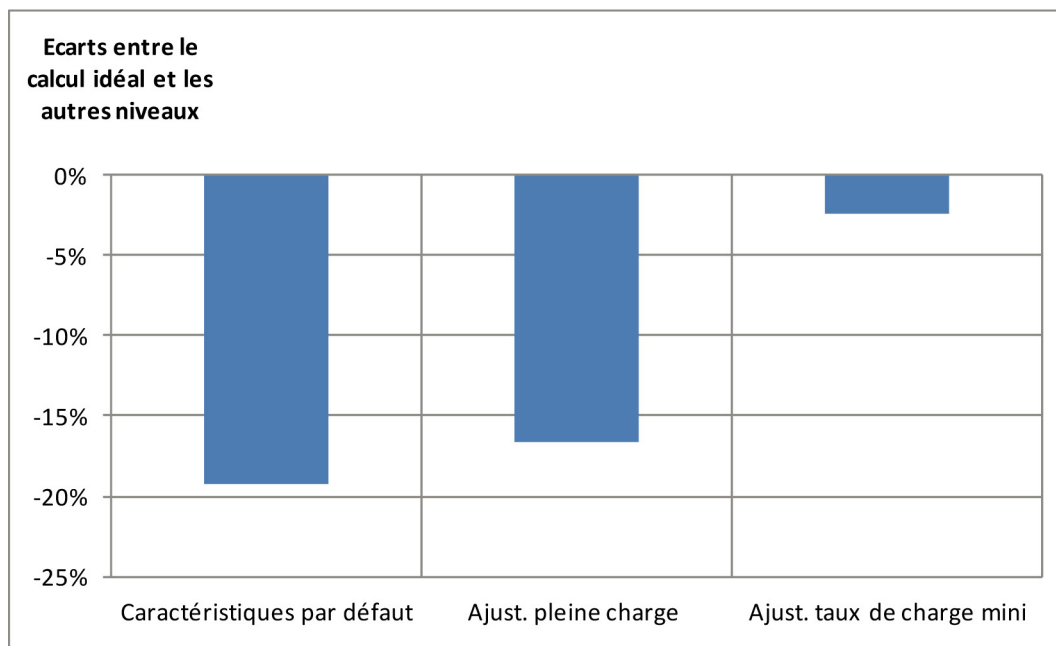
Le site n°4 possède un compresseur à vitesse variable et sert donc d'appui pour cette étude de sensibilité. Pour ce site, des simulations sont effectuées pour plusieurs types d'ajustement :

- « Idéal » : ajustement des caractéristiques à pleine charge avec les données du fabricant pour 8 points de fonctionnement et du taux de charge minimal estimé à partir des mesures.
- « Caractéristiques par défaut » : les caractéristiques à pleine charge avec les données du fabricant sont utilisées pour un unique point de fonctionnement, les caractéristiques à charge partielle étant les valeurs par défaut ³ ;
- « Ajust. pleine charge » : les caractéristiques à pleine charge avec les données du fabricant sont utilisées pour 8 points de fonctionnement les caractéristiques à charge partielle étant les valeurs par défaut ;
- « Ajust. taux de charge mini » : les caractéristiques à pleine charge avec les données du fabricant sont utilisées pour un unique point de fonctionnement, les caractéristiques à charge partielle avec le taux de charge minimal étant estimées à partir des mesures.

L'écart entre le calcul de la performance saisonnière de la pompe à chaleur ⁴ pour un paramétrage « idéal » avec ceux correspondants aux autres niveaux est présenté à la (Figure 7).

■ 3 Dans la réglementation thermique 2012, PLRmin est pris par défaut égal à 40% et PLFmin à 100%.

■ 4 La performance saisonnière de la pompe à chaleur (SCOP) représente dans cette étude le ratio entre le besoin thermique annuel et la consommation électrique de la PAC.



▲ **Figure 7 :** Impact des caractéristiques à pleine charge et à charge partielle sur le calcul du SCOP de la PAC (site n°4)

Les écarts de performance saisonnière de la pompe à chaleur sont toujours négatifs. Autrement dit, le SCOP de la PAC estimé avec des caractéristiques par défaut est supérieur à celui estimé dans le cas « idéal ». Autrement dit, la consommation estimée par le modèle avec toutes les données disponibles (cas « idéal ») est, pour ce cas d'étude, toujours supérieure à celle estimée avec un plus faible nombre de données caractérisant les propriétés techniques de la pompe à chaleur.

L'estimation de la consommation annuelle de la pompe à chaleur est plus impactée par le paramétrage du modèle de charge partielle que le paramétrage de la pleine charge.

A retenir

Le paramétrage du modèle de charge partielle est un élément fortement impactant pour une pompe à chaleur à compresseur à vitesse variable. Mais ces paramètres étant difficiles à déterminer pour l'installateur, il est nécessaire d'identifier des valeurs par défaut pour ce type de pompe à chaleur.

Régulation de puissance : PAC à 2 compresseurs en tout ou rien

A partir d'une certaine taille d'installation, la pompe à chaleur peut posséder plusieurs compresseurs.

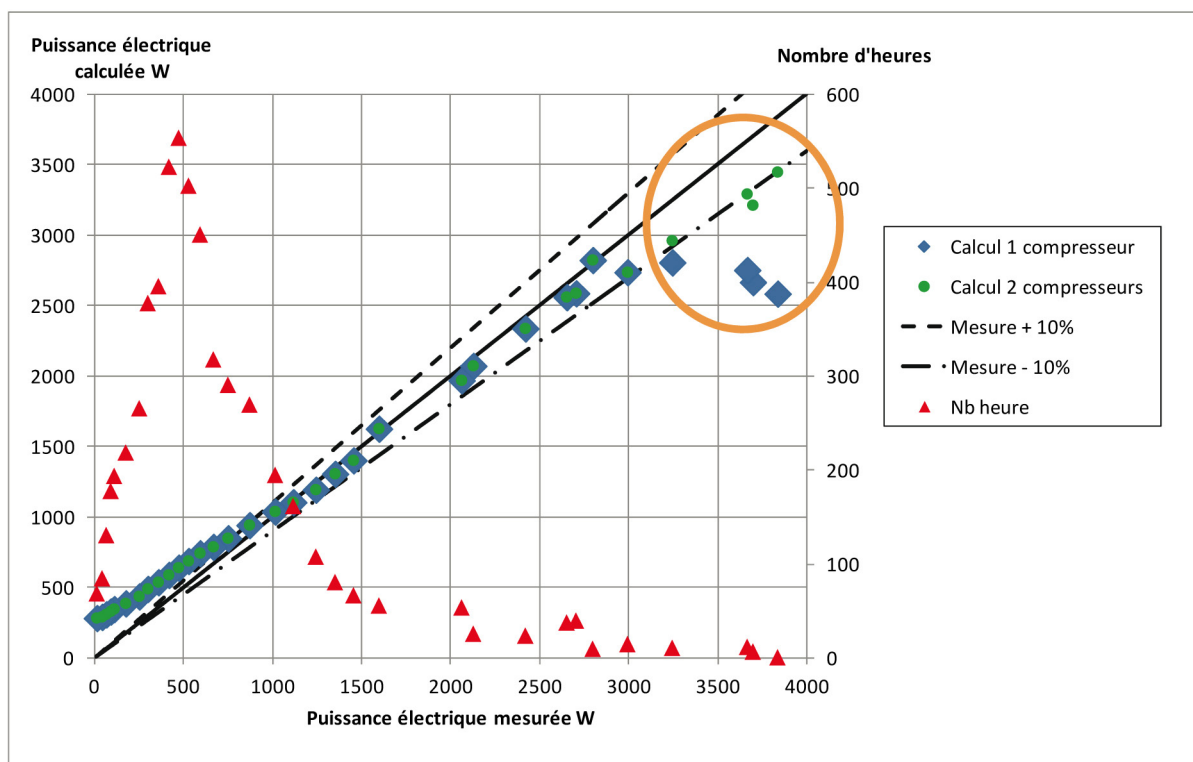
Pour évaluer la pertinence du modèle mathématique de pompe à chaleur à deux étages de puissance (proposé en annexe), le suivi du site n°2 est exploité (la pompe à chaleur intègre deux compresseurs).

La (Figure 8) permet de visualiser la puissance électrique de la pompe à chaleur (compresseur, ventilateur) calculée par le modèle en fonction de la puissance électrique mesurée :

- Les carrés bleus représentent les résultats obtenus pour un modèle mathématique avec un étage de puissance ;
- Les ronds verts représentent les résultats obtenus pour un modèle tenant compte du deuxième étage de puissance.

Les différents points ont été calculés pour des intervalles de température extérieure de 1°C sur l'année de mesures.

L'axe des ordonnées secondaire permet de visualiser le nombre d'heures mesurées (triangles rouges). Par exemple, la pompe à chaleur a appelé une puissance électrique moyenne de 500 W pendant environ 550 heures.



▲ Figure 8 : Comparaison d'un modèle à 1 compresseur et d'un modèle à 2 compresseurs

La modélisation de la régulation bi-étagée de la pompe à chaleur est identifiée sur les points cerclés en orange.

La précision du modèle pour la prévision de la puissance atteint un écart relatif de l'ordre de 10% avec la mesure si la régulation bi-étagée est prise en compte.

Alors que si la pompe à chaleur avait été modélisée avec un seul étage de puissance, la puissance aurait été sous estimée d'environ 30%.

Pour ce site, l'utilisation des caractéristiques techniques de la PAC en fonctionnement à deux compresseurs a un impact négligeable sur la consommation annuelle (de l'ordre du pourcent).

Mais, si le système avait été correctement dimensionné (pour ce site la PAC pouvait fournir 220% de la puissance calorifique nécessaire à la température de base), le nombre d'heures de fonctionnement au 2^{ème} étage de puissance aurait été plus important et l'impact de cette régulation également.

A retenir

Si la pompe à chaleur utilisée possède plusieurs compresseurs, il est nécessaire d'intégrer les informations relatives à chacun des étages de puissance. Le modèle proposé permet de simuler ce type de pompe à chaleur.

Consommation des accessoires en veille « passive »

La consommation de veille « passive » de la pompe à chaleur représente la consommation de la PAC lorsqu'aucun besoin thermique horaire n'est requis. La puissance électrique résiduelle provient des accessoires (régulateur et résistance de carter).

Pour savoir s'il est nécessaire de comptabiliser cette consommation, une analyse des données mesurées a été effectuée.

Pour les sites n°1 à 3, la consommation de veille « passive » est négligeable devant la consommation des accessoires en mode « actif » car :

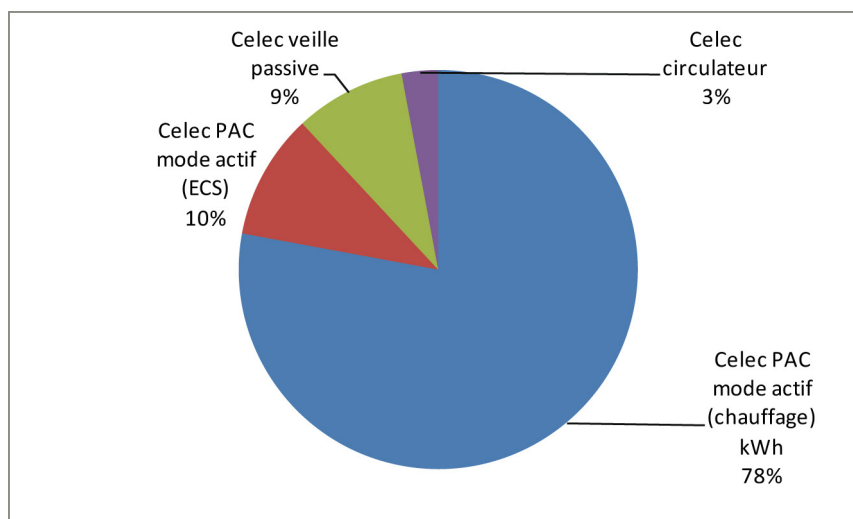
- Le nombre d'heures à besoin thermique nul est négligeable sur la saison de chauffe ;
- La pompe à chaleur est arrêtée manuellement hors saison de chauffe.

Mais, pour le site n°4, l'installation est utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Comparativement aux autres sites, la part de consommation de la veille est importante : de l'ordre de 10% (Figure 9). En effet, la pompe à chaleur reste en fonctionnement toute l'année.

La consommation de « veille passive » peut être estimée par le modèle proposé. Les différents suivis montrent que cette consommation peut être négligeable dans la plupart des cas. Mais pour un des sites, il est nécessaire d'en tenir compte.

A retenir

Si la pompe à chaleur est susceptible de fonctionner toute l'année, la veille d'une pompe à chaleur peut atteindre une part de consommation non négligeable. Le modèle mathématique proposé intègre cette consommation de veille.



▲ Figure 9 : Détails des répartitions de la consommation des postes (site n°4)

1.3. • Sensibilité de la conception hydraulique

Les configurations hydrauliques peuvent être variées (voir la « schémathèque de pompes à chaleur en habitat individuel » dans le cadre du programme Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012), par exemple :

- Couplage direct ;
- Volume tampon à 2 piquages (série) ;
- Organe de découplage ;
- Volume tampon à 4 piquages (parallèle).

Il est nécessaire d'examiner l'impact de ces configurations.

Compte tenu de la nature des sites disponibles, les analyses menées se limitent à l'impact :

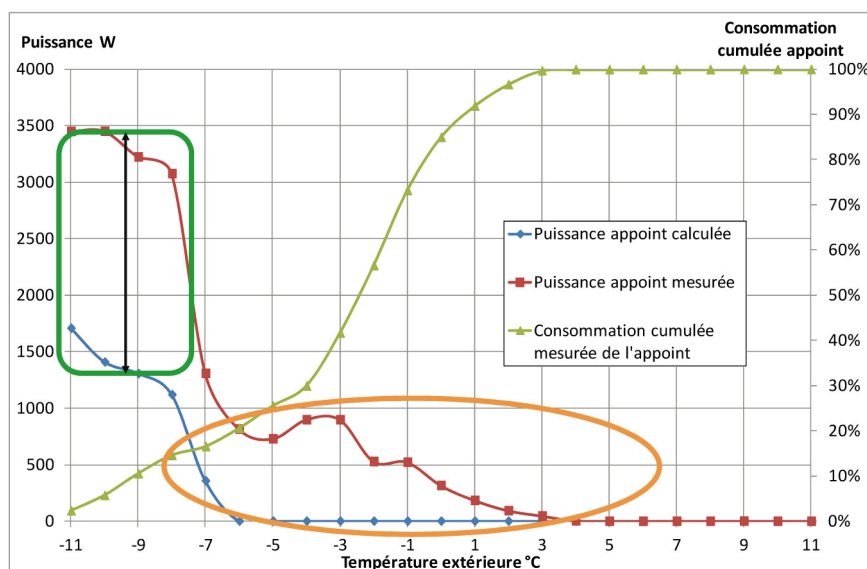
- Du positionnement de l'appoint électrique ;
- De l'intégration d'un bypass.

La conception hydraulique peut avoir un impact à travers la qualité de l'isolation du réseau ou des ballons. Un outil de modélisation devrait donc permettre d'intégrer les pertes thermiques du réseau de distribution. Compte tenu de la nature des données disponibles (production thermique aux bornes de la production), la modélisation des pertes thermiques du réseau de distribution n'est pas examinée dans cette étude.

1.3.1. • Impact du positionnement de l'appoint électrique

Pour le site n°1, l'appoint électrique est positionné dans une cartouche de faible volume (de l'ordre de deux litres).

Ce site permet de connaître l'impact de ce type de positionnement qui n'est pas intégré au modèle mathématique proposé.



▲ Figure 10 : Comparaison entre la puissance de l'appoint calculée et mesurée

D'une part, le positionnement de l'appoint électrique sur le réseau hydraulique (dans un faible volume plutôt que dans un volume tampon) a pour conséquence d'enclencher l'appoint électrique lors du dégivrage de la pompe à chaleur (zone cerclée en orange). Ce défaut de conception représente environ 80% de la consommation de l'appoint sur la saison ce qui permet d'expliquer la majorité de l'écart entre le calcul et la mesure.

D'autre part, des écarts importants aux températures les plus basses sont identifiables dans le rectangle vert. Ils proviennent d'une mauvaise régulation de l'appoint électrique et de la pompe à chaleur : l'appoint s'enclenche alors que la PAC ne fournit pas sa température d'eau maximale. Pour ce site, ce fonctionnement ne représente que 10% de la consommation annuelle de l'appoint donc une part négligeable de la consommation annuelle du système.

A retenir

Le modèle développé ne permet pas de simuler un appoint qui n'est pas intégré à un volume tampon. D'autre part, si un appoint électrique est nécessaire, il devrait être placé dans un volume tampon (voir le guide « Schémathèque des pompes à chaleur en habitat individuel » du programme Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012).



1.3.2. • Impact d'un bypass

Une analyse a été menée pour connaître l'impact énergétique du bypass du site n°1.

Le dimensionnement des émetteurs est supposé tel que la différence de températures aux bornes du secondaire est de 15 K pour la température extérieure de base.

Le bypass a pour rôle de rendre compatible l'écart de température aux bornes de la pompe à chaleur et celui aux bornes des émetteurs. Cependant, il génère un mélange entre la température de départ de la pompe à chaleur et la température de retour des émetteurs. La température en entrée de pompe à chaleur ainsi obtenue influence les performances.

Le gain pour la performance saisonnière de la pompe à chaleur (hors circulateur) par rapport à une PAC fonctionnant avec une différence de température de 5 K est estimé (Figure 11) :

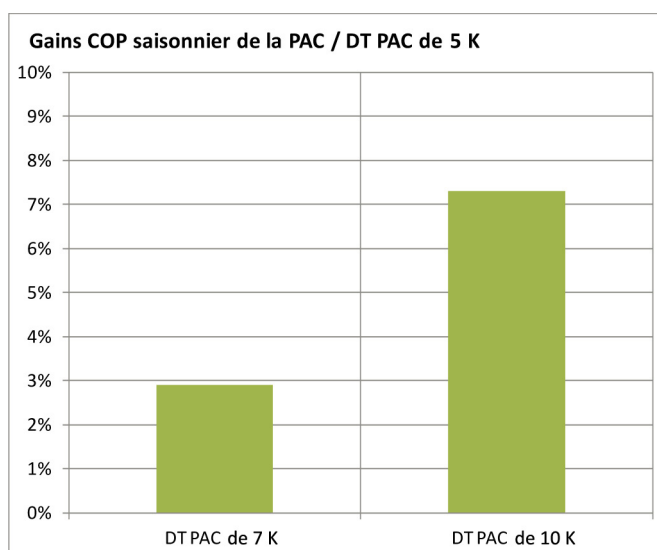
- A 3% pour une PAC avec une différence de température de 7 K ;
- A 9% pour une PAC avec une différence de température de 10 K.

En plus de ce gain sur les consommations de la machine, la consommation globale de l'installation est également réduite car le circulateur primaire appelle moins de puissance.

Nota : les besoins thermiques mesurés sur la pompe à chaleur et la loi d'eau du site n°1 ont été utilisés pour évaluer ce gain.

A retenir

Le différentiel de température admissible de la pompe à chaleur a un faible impact sur la performance saisonnière. Néanmoins le modèle mathématique proposé permet de modéliser la présence d'un bypass.



▲ Figure 11 : Impact du différentiel de température de dimensionnement sur le SCOP de la PAC

1.4. • Sensibilité du modèle vis-à-vis des paramètres liés à l'exploitation

La consommation du système de production et de distribution dépend de sa régulation et de sa mise au point, en particulier :

- De la loi d'eau ;
- De l'ordre de mise en marche des générateurs ;
- Du réglage du débit.

Les suivis utilisés dans le cadre de cette étude n'ont pas permis d'examiner en détails la modélisation de l'ordre de mise en marche des générateurs.

1.4.1. • Impacts de la loi d'eau utilisée

Pour notre étude de sensibilité, la température d'alimentation des émetteurs en fonction de la température extérieure a été paramétrée de plusieurs façons :

- « Aucune loi d'eau » : la température est prise constante et égale à la température maximale mesurée sur site ;
- « Loi d'eau sélectionnée (1 pt avec T_d à T_{base} mesurée + 10°C) » : la loi d'eau est linéaire. Elle est paramétrée en fonction de la nature des émetteurs et à partir de la température de départ (T_d) mesurée à la température extérieure de base (T_{base}) majorée de 10°C, la température est fixée à 20°C pour une température de 18°C ;
- « Loi d'eau sélectionnée (1 pt avec T_d à T_{base} mesurée) » : la loi d'eau est linéaire. Elle est paramétrée en fonction de la nature des émetteurs et à partir de la température de départ mesurée à la température extérieure de base, la température est fixée à 20°C pour une température de 18°C ;
- « Loi d'eau mesurée » : la loi d'eau a été évaluée à partir des mesures de température de départ de la pompe à chaleur en moyenne sur la saison de chauffe.

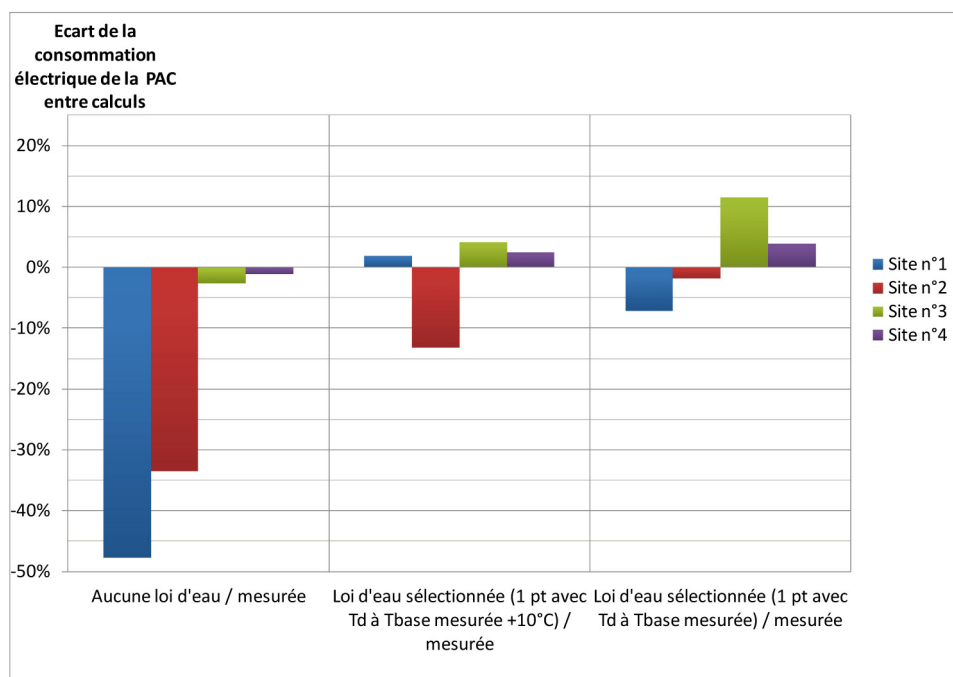
La sensibilité du type de paramétrage est donnée à la (Figure 12) pour les quatre sites. L'écart de consommation est donné par rapport au paramétrage selon la loi d'eau mesurée.

Le type de paramétrage de la loi d'eau a un impact important sur l'évaluation de la consommation. Par exemple, la majoration de 10°C, par rapport à la température de fonctionnement des émetteurs, peut avoir un impact non négligeable sur l'évaluation de la consommation (de plus de 10% pour le site n°2).

Pour le site n°1, l'absence de prise en compte de la loi d'eau aurait impacter la consommation estimée de la PAC d'environ 50%.

A retenir

Le paramétrage d'une loi d'eau adaptée à la température d'alimentation des émetteurs est un élément impactant la consommation.



▲ Figure 12 : Impact de la loi d'eau utilisée

1.4.2. • Réglage du débit

L'impact d'un réglage de débit est analogue à celui d'un bypass.

Comme calculé au paragraphe (cf. 1.3.2), par la relation entre débit et différence de températures aux bornes de la pompe à chaleur, l'impact sur la performance de la PAC peut atteindre 9%.

Lors de la mise en œuvre de l'installation, un mauvais réglage de débit peut donc entraîner une perte de performance du même ordre de grandeur.

A retenir

Le modèle de pompe à chaleur proposé permet d'estimer l'impact énergétique d'une modification du débit primaire même si cet impact est négligeable devant d'autres phénomènes.

1.4.3. • Gestion des circulateurs

Pour le site n°2, un arrêt automatique du circulateur primaire est prévu lorsque la température extérieure est supérieure à une certaine limite (température de non chauffage).

Or l'installation est mise à l'arrêt manuellement par le propriétaire, l'impact de la gestion automatisée ne représente qu'une variation d'environ 2 % de la consommation du système.

A retenir

Si l'installation n'est pas arrêtée manuellement, en fonction de la régulation propre au fabricant de la pompe à chaleur, il peut être nécessaire d'intégrer dans le modèle mathématique le temps de fonctionnement du circulateur en dehors de la période de chauffe.

Nota : Pour le site n°4, le circulateur s'arrête automatiquement mais est remis en marche ponctuellement pour irriguer la sonde de température. Ce mode de fonctionnement n'est pas pris en charge par le modèle mathématique proposé à l'[Annexe 1].

1.5. • Importance du dimensionnement

Dimensionnement de la PAC sur la performance saisonnière

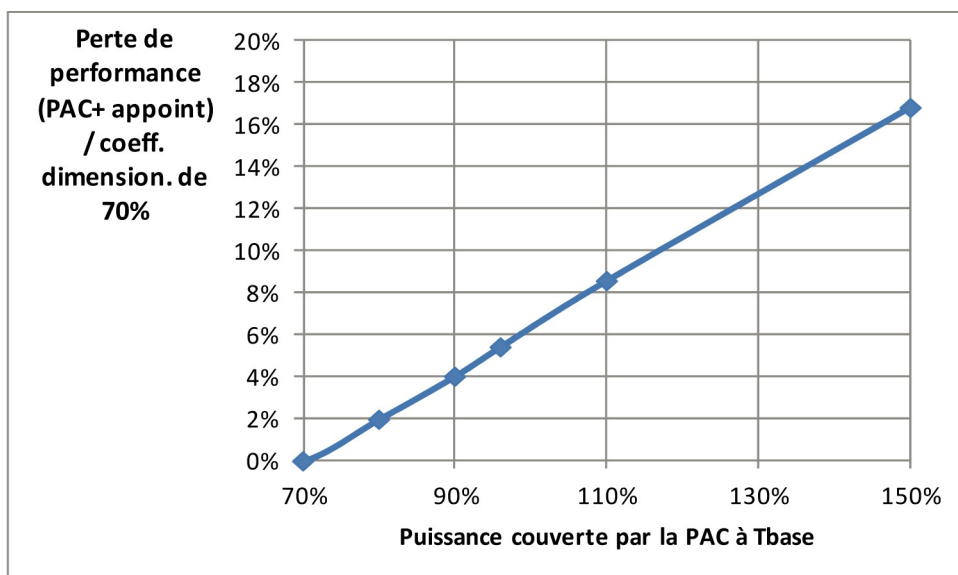
Pour ce qui est de l'aide à la conception de l'installation, les outils peuvent permettre d'aider l'installateur à effectuer un dimensionnement de la pompe à chaleur à travers un calcul de déperditions :

- Un calcul conforme à la norme NF EN 12831 ;
- Un indicateur permettant d'estimer le dimensionnement de la PAC à la température extérieure de base en fonction des déperditions de la maison.

Pour savoir s'il est nécessaire de prévoir cette aide au dimensionnement dans un outil, une analyse de sensibilité est menée pour un des quatre sites.

Le modèle décrivant les caractéristiques à pleine charge de la PAC étant adimensionné, la puissance de la PAC à 7°C extérieur et 35°C sur l'eau est fixé à différentes valeurs pour atteindre différents coefficients de dimensionnement (rapport entre la puissance calorifique disponible à la température de base et pour la température des émetteurs).

Pour ce site (pompe à chaleur fonctionnant en tout ou rien), la puissance calorifique mesurée de la PAC atteint 96% de la puissance à couvrir à la température extérieure de base. La sensibilité du dimensionnement sur la performance saisonnière du système (pompe à chaleur et appoint) pour ce site est examiné à la (Figure 13).



▲ Figure 13 : Impact du coefficient de dimensionnement sur la performance de la pompe à chaleur

Pour cette pompe à chaleur, le dimensionnement a un impact sur la performance estimée (de la PAC et de l'appoint) qui peut être non négligeable.

A retenir

Comme le dimensionnement peut avoir un impact non négligeable, une aide au dimensionnement est utile pour optimiser la performance saisonnière du système (PAC et appoint).

Impact du dimensionnement de la PAC sur le circulateur

Le dimensionnement de la pompe à chaleur peut impacter indirectement le dimensionnement du circulateur. Car plus la puissance calorifique est importante, plus le débit traversant le condenseur est important, et donc plus la puissance nominale du circulateur l'est également.

Pour le site n°2, le suivi a permis de souligner que, à la température de base, la puissance calorifique nécessaire était environ deux fois moins élevée que la capacité maximale de la pompe à chaleur.

Ce surdimensionnement entraîne la nécessité d'installer un circulateur de taille importante pour respecter le débit nominal de la PAC. La proportion de la consommation du circulateur du site n°2 est supérieure à celle des autres sites car l'installation est surdimensionnée par rapport au besoin réel de la maison (voir tableau [Annexe 2]).

A retenir

Le surdimensionnement de la pompe à chaleur entraîne un surdimensionnement du circulateur et donc de la consommation de ce poste.

La mise en place d'une aide au dimensionnement est importante pour optimiser la conception d'une installation (pompe à chaleur et circulateur).



1.6. • Evolution des consommations en fonction du climat

Le climat impacte la consommation du système : un climat plus rude entraîne une augmentation de la consommation électrique.

Pour l'étape de conception de l'installation, l'outil doit posséder une base de données météorologique adaptée aux différentes zones climatiques françaises.

Dans l'objectif de réaliser un suivi annuel de la consommation du système, voire de prendre des engagements sur celle-ci, la possibilité d'intégrer dans l'interface une ou plusieurs de ces données doit être examinée :

- La température extérieure mesurée (de façon horaire ou par une distribution) ;
- Le nombre de DJU ;
- La durée de la saison de chauffe...

Ces différentes données climatiques sont examinées dans la partie suivante.

Confrontation du modèle de pompe à chaleur à des relevés

2



Les différentes analyses menées à la partie 1 ont permis d'identifier les principaux effets impactant à intégrer dans un modèle mathématique.

Certaines données du modèle proposé étant peu sensibles, certaines informations peuvent être intégrées plus tardivement dans le projet ou écartées des informations nécessaires. Les principales données nécessaires sont classifiées à travers trois principaux niveaux d'informations (cf. 2.1.1).

Ces trois principaux niveaux, ainsi que d'autres variantes, sont analysés en comparant la performance saisonnière mesurée de la pompe à chaleur avec les prévisions du modèle (cf. 2.1.2), et ce pour chacun des quatre sites suivis.

Ces analyses permettent de tirer des enseignements sur les données nécessaires, à renseigner par un professionnel. Ces informations sont déterminées pour assurer un optimum entre le nombre d'informations (en tenant compte de la facilité à y avoir accès ou à les déterminer) et la précision pour les étapes de vie d'un projet d'installation de pompe à chaleur (partie (cf. 2.2) pour la phase de conception, partie (cf. 2.3) pour l'exploitation). La faisabilité d'une correction simplifiée de la consommation électrique est également discutée (cf. 2.4).

2.1. • Identification de niveaux d'informations

2.1.1. • Synthèse de 3 niveaux d'informations

Trois principaux niveaux (« simple », « intermédiaire » et « complexe ») sont proposés dans le tableau suivant. Ces niveaux ont été créés par l'intégration croissante de données mesurées.

Le niveau simple s'appuie notamment sur des informations disponibles dès la phase de conception d'une offre commerciale par exemple :

- Estimation « grossière » du niveau de température des émetteurs ;
- Caractéristiques nominales de la pompe à chaleur pour un seul point de fonctionnement.

Ces informations pourraient être connues ou estimées par le professionnel. Elles pourraient être à renseigner dans l'interface. Les autres informations requises pour le niveau simple pourraient être : soit intégrées au moteur de calcul de l'outil (non accessibles à l'utilisateur), soit pré-renseignées dans l'interface (par exemple à travers une liste déroulante).

A contrario, le niveau complexe requiert, entre autre, une mesure de la loi d'eau et de la température extérieure. Ces données ne sont disponibles qu'une fois l'installation mise en service, ce qui positionne de préférence ce niveau d'information pour les phases d'exploitation du système.

La pertinence de ces trois principales propositions est examinée à la partie suivante. Le tableau ci-dessous détaille les valeurs, paramétrages et hypothèses associés à chacun de ces niveaux.

Un niveau de « Référence » est également introduit pour servir de comparaison.

		Nomenclature	Référence	Niveau complexe	Niveau intermédiaire	Niveau simple
Caractéristiques à pleine charge	COP pleine charge de la PAC	COP _{pc}	Paramétrage avec 4 points de fonctionnement selon info. constructeur	Paramétrage avec 4 points de fonctionnement selon info. constructeur	Paramétrage avec 1 point de fonctionnement selon info. constructeur	Paramétrage avec 1 point de fonctionnement selon info. constructeur
	Puissance calorifique disponible de la PAC	P _{thpc}	Paramétrage avec 4 points de fonctionnement selon info. constructeur	Paramétrage avec 4 points de fonctionnement selon info. constructeur	Paramétrage avec 1 point de fonctionnement selon info. constructeur	Paramétrage avec 1 point de fonctionnement selon info. constructeur
Caractéristiques de performance à charge partielle	Coefficient de dégradation	C _c	90%	90%	90%	90%
	Taux de charge mini	PLR _{min}	40%	Mesuré	40%	40%
	Facteur de perf. au taux de charge mini	PLF _{min}	100%	100%	100%	100%

	Nomenclature	Référence	Niveau complexe	Niveau intermédiaire	Niveau simple
Puissances des circulateurs	-	Mesuré	Mesuré	Mesuré	Puissance nominale fabricant
Paramétrage d'une loi d'eau	-	Mesuré	Mesuré	1 point de paramétrage avec Td à Tbase mesuré	1 point de paramétrage avec Td à Tbase sur estimé de 10°C
Climat (température extérieure)	-	Mesuré	Mesuré	Fichier climatique type	Fichier climatique type

▲ Figure 14 : Niveaux d'informations analysés

2.1.2. • Analyse de la performance saisonnière de la pompe à chaleur

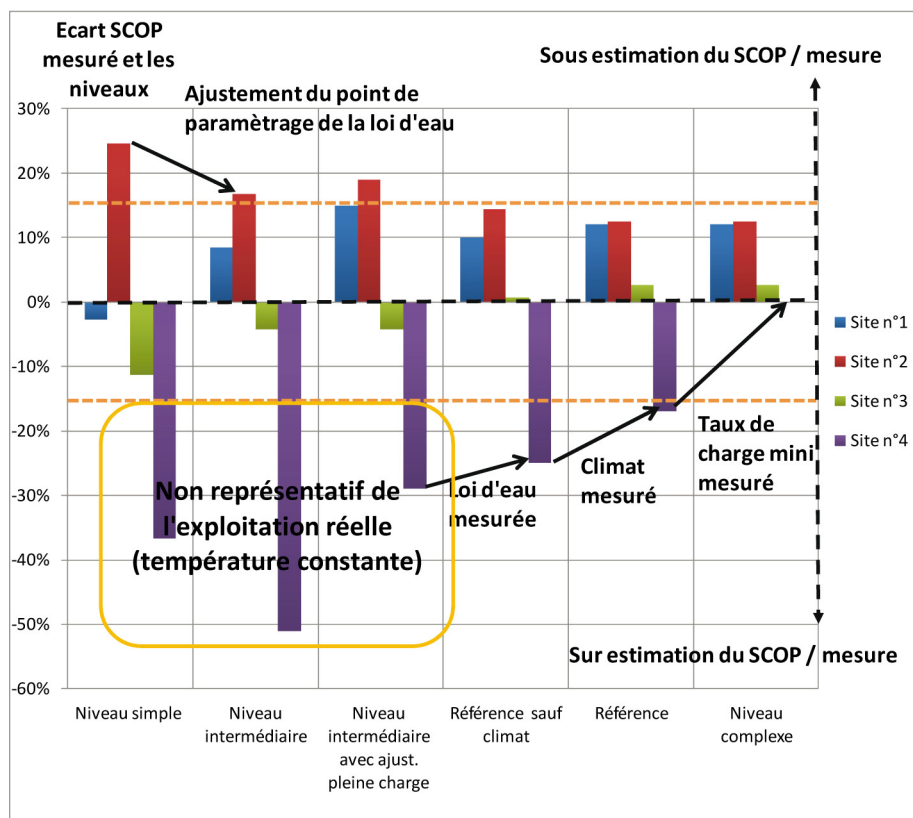
Pour connaître la pertinence de ces niveaux, puis proposer les informations pertinentes pour estimer avec précision suffisante la performance d'une pompe à chaleur (cf. 2.2 et 2.3), une analyse des écarts entre la performance saisonnière de la pompe à chaleur calculée et la mesure est menée (l'appoint n'est pas intégré à ces analyses).

Certaines variantes ont été ajoutées par rapport à la définition des trois niveaux définis à la (Figure 14) pour mettre en évidence l'impact de certaines entrées :

- « Niveau intermédiaire avec ajust. pleine charge » : correspond au niveau intermédiaire avec un ajustement des données techniques à pleine charge de la pompe à chaleur selon 8 points de fonctionnement ;
- « Niveau de référence sauf climat » : correspond au niveau de référence sans utiliser le climat mesuré.

Les résultats des écarts à la mesure sont synthétisés à la (Figure 15). L'impact des différentes entrées et paramétrages utilisés sont représentés schématiquement par les flèches noires.

La valeur de plus ou moins 15% a été retenue pour qualifier de satisfaisant l'écart entre la consommation calculée et la consommation mesurée.



▲ Figure 15 : Ecart de performance saisonnière de la pompe à chaleur par rapport aux mesures

Analyse pour les sites n°1 à 3

Les sites n°1 à 3 correspondent à des pompes à chaleur régulées en tout ou rien et n'assurant que le chauffage.

Pour les sites n°1 et n°3, le SCOP calculé à partir du niveau « simple » permet d'obtenir une approximation assez précise (dans un intervalle de plus ou moins 15%).

Pour le site n°2, ce seuil est atteint pour le niveau « intermédiaire ».

Pour les sites n°1 à n°3, l'ajustement des propriétés techniques de la pompe à chaleur à pleine charge (puissance calorifique et COP paramétrés sur un ou plusieurs points de fonctionnement) a un impact limité sur l'estimation.

Il en est de même pour la loi d'eau mesurée.

Le climat mesuré (température extérieure mesurée) a un impact limité pour ces 3 sites. Partant de ce constat, un professionnel aurait pu, pour ces trois sites, escompter obtenir (à plus ou moins 15% près) le SCOP de la pompe à chaleur après un diagnostic thermique de la maison et des émetteurs (niveau de température de fonctionnement des émetteurs).



Analyse pour le site n°4

Sur le site n°4, la pompe à chaleur est de type Inverter (modulation de vitesse du compresseur).

Pour le site n°4, les niveaux d'informations « simple » et « intermédiaire » ne permettent pas de prédire de manière suffisamment fiable le SCOP de la pompe à chaleur.

L'ajustement du paramétrage de la température des émetteurs vis-à-vis de la température effectivement constatée a un effet inverse par rapport aux autres sites. En effet, sur ce site, aucune loi d'eau n'était programmée. C'est ce qui explique que l'écart à la mesure augmente entre le niveau « simple » et le niveau « intermédiaire ».

De plus, la modification du taux de charge minimal (PLRmin), d'une valeur de 40% (valeur par défaut de la Réglementation Thermique 2012) à une valeur de 60% (estimé à partir de mesures sur site), a une influence non négligeable sur l'écart du SCOP (passage d'un écart de -15% à +1%). Les impacts de la loi d'eau mesurée ou du climat sont faibles devant celui du taux de charge minimal.

A retenir

Pour les installations de notre panel où la pompe à chaleur fonctionne en tout ou rien, le modèle, renseigné avec des valeurs simples et avec un diagnostic de la température de fonctionnement des émetteurs, permet d'obtenir une estimation précise de la performance saisonnière de la pompe à chaleur.

Pour la pompe à chaleur à compresseur à vitesse variable, le modèle renseigné avec des valeurs d'un niveau relativement poussé (niveaux « intermédiaire » ou « référence »), ne permet pas d'obtenir une estimation précise de la performance. L'élément clé semble être le bon paramétrage du modèle d'évolution des performances en fonction du taux de charge.

2.2. • Informations requises en phase de conception

D'après les analyses précédentes, un nombre minimal de données peut permettre une estimation de la consommation de la pompe à chaleur avec une précision acceptable.

2.2.1. • Cas d'une pompe à chaleur en tout ou rien

Pour la phase de conception, pour les 3 pompes à chaleur fonctionnant en tout ou rien (site n°1, n°2 et n°3), la future performance saisonnière de la pompe à chaleur (SCOP) peut être évaluée de manière fiable (à plus ou moins 15% près) à partir :

- D'un fichier météorologique trentenaire ;
- Des propriétés techniques à pleine charge paramétrées à partir d'un point de fonctionnement à 7°C de température extérieure et 35°C sur le départ d'eau et des données par défaut ;



- Du coefficient de dégradation à charge partielle (C_c) à une valeur de 90% ;
- D'une loi d'eau correctement paramétrée à partir de la température de départ à la température de base. Cette température doit être estimée de préférence à partir d'un diagnostic des émetteurs et du bilan thermique de la maison, ou a minima du type d'émetteurs. Dans ce dernier cas, cela revient à supposer que les émetteurs ne sont pas surdimensionnés.

2.2.2. • Cas d'une pompe à chaleur à compresseur à vitesse variable

Pour la pompe à chaleur possédant un compresseur à vitesse variable (site n°4), le professionnel souhaitant installer cette pompe à chaleur aurait été dans l'incapacité d'estimer de manière fiable la future performance de la pompe à chaleur. En effet, pour cette pompe à chaleur, les mesures ont permis de constater que le taux de charge minimal de la pompe à chaleur était bien supérieur à celui proposé par défaut dans la réglementation thermique 2012.

Comme l'a souligné l'étude menée sur l'analyse de produits dans l'étude « les pompes à chaleur avec Inverter » du programme Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, certains produits ne disposent pas d'une plage de variation de vitesse importante. La valeur maximale constatée lors du suivi est de 60% par rapport à la puissance maximale.

A retenir

Il est sans doute préférable que l'estimation de performance obtenue par le modèle soit plutôt conservatrice. Dans cet objectif, à défaut d'informations plus précises recueillies auprès du fabricant, l'utilisation d'une valeur pénalisante pour le taux de charge minimum (PLRmin) est recommandée (par exemple 60%).

2.2.3. • Intermittences journalières

Trois types d'intermittences journalières de la production peuvent être distingués :

- Le réduit de nuit (réduction de la température de consigne de départ d'eau de la pompe à chaleur) ;
- La charge d'un volume tampon à 4 piquages ;
- Un asservissement aux heures creuses.

Lors de la mise en réduit de nuit, l'appoint électrique peut se mettre en marche le matin pour compenser le manque de puissance de la pompe à chaleur.

Ces types de fonctionnement n'ont pas été constatés sur les sites suivis.

A retenir

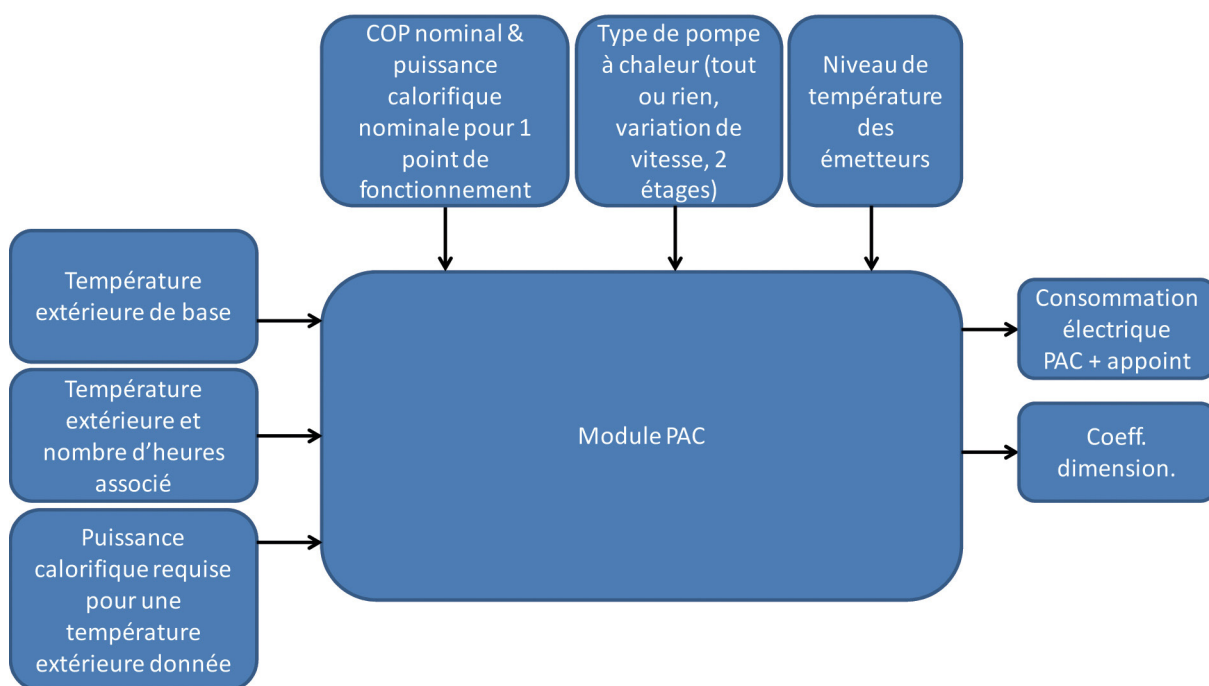
Les intermittences journalières sont à modéliser par une méthode de calcul permettant de distinguer les différentes périodes de fonctionnement et ce, dès la conception de l'installation. Une méthode par intervalles de température extérieure ou une méthode horaire peuvent convenir dans ces deux cas.

2.2.4. • Synthèse des informations nécessaires en conception

Pour la phase de conception, quel que soit le type de pompe à chaleur, le diagramme suivant permet d'illustrer l'organisation des informations nécessaires pour le module de pompe à chaleur :

- Les entrées du modèle de pompe à chaleur (à gauche) : la puissance thermique requise (cette puissance peut être calculée avec un modèle d'enveloppe du bâtiment) et un fichier météorologique trentenaire (par exemple un fichier horaire de température extérieure issue d'une base de données) ;
- Les paramètres à renseigner par l'utilisateur (en haut) ;
- Les sorties du module (à droite) : la puissance électrique appelée par la pompe à chaleur.

Le calcul peut alors être mené par intervalle de température extérieure ou au pas de temps horaire pour obtenir la consommation électrique du système (PAC et appoint).



▲ Figure 16 : Exemple de diagramme pour le module de pompe à chaleur pour la phase de conception

Commentaire

Il est souhaitable que l'outil intègre également les éléments nécessaires pour réaliser un calcul économique.

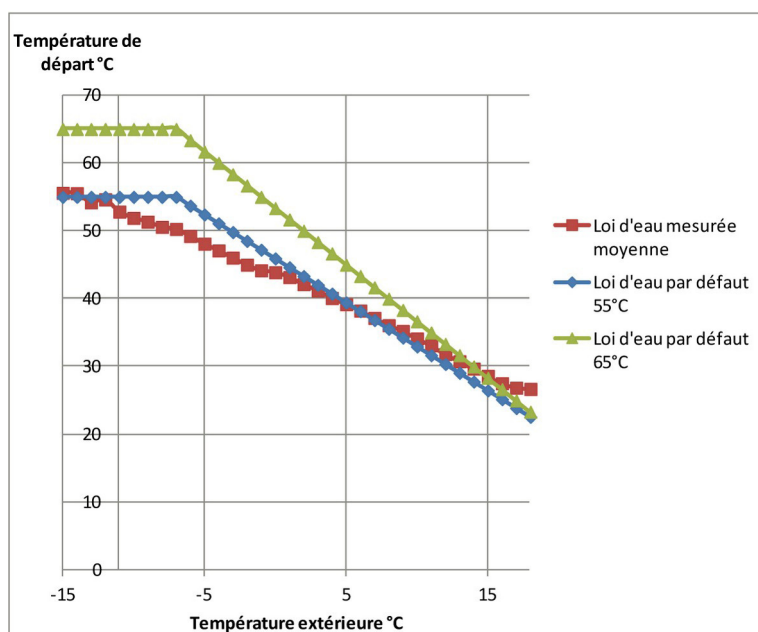
2.3. • Informations requises en phase d'exploitation

Une mauvaise prise en compte de la programmation réelle de la loi d'eau peut engendrer des écarts importants entre la prévision de la consommation du modèle et la mesure (par exemple, cas du site n°2 ou du site n°4).

A retenir

Un écart important entre les résultats de la consommation fournie par le modèle et la mesure peut provenir d'une surestimation (ou, plus rarement, d'une sous-estimation) de la température d'eau de fonctionnement de la pompe à chaleur et indirectement de la température de fonctionnement des émetteurs.

Lors du suivi de la consommation, une mesure de la loi d'eau peut être nécessaire pour comprendre des écarts entre la prévision et la mesure.



▲ Figure 17 : Comparaison de la loi d'eau calculée par rapport à la mesure (site n°2)

2.4. • Vers une correction climatique simplifiée

Les calculs menés précédemment s'appuyaient :

- Soit sur un fichier météorologique trentenaire ;
- Soit sur la mesure de la température extérieure.

Il s'agit de tester la faisabilité d'une approche simplifiée permettant de corriger la prévision de la consommation électrique de la pompe à chaleur (obtenue à partir d'une météo trentenaire) sans aucune mesure du climat réel.



Principe de la méthode simplifiée de correction climatique

A partir d'un certain niveau d'informations, une performance saisonnière prévisionnelle de la pompe à chaleur (notée $SCOP_{prévision}$) peut être calculée.

Dans un souci de disposer d'un dispositif minimal métrologique et de traitement de données par un professionnel, cette performance prévisionnelle est supposée être invariante selon le climat.

Or, la performance saisonnière s'exprime comme le ratio entre le besoin thermique annuel du bâtiment (C_{th}) et la consommation électrique annuelle (C_{elec}) donc :

$$SCOP_{prévision} \approx \frac{C_{th\ prévision}}{C_{elec\ prévision}} \approx \frac{C_{th\ corrigé}}{C_{elec\ corrigé}}$$

Alors :

$$C_{elec\ corrigé} \approx \frac{C_{th\ corrigé}}{SCOP_{prévision}}$$

Une première approche pour corriger le besoin thermique serait de le mesurer annuellement sans aucune mesure de la température extérieure. D'autres méthodes, pourraient être envisageables comme par exemple une correction par DJU.

Etudes de cas

Pour analyser la pertinence de l'hypothèse précédente et de la correction proposée (c'est-à-dire le faible impact de la variation du climat d'une année à l'autre sur la performance saisonnière), la consommation électrique de la pompe à chaleur (ajustée à la consommation thermique mesurée) a été comparée à la consommation mesurée : le calcul effectué n'intègre pas la mesure de la répartition des températures extérieures.

Pour positionner cette correction climatique simplifiée vis-à-vis des études de cas, il est nécessaire de comparer l'écart entre la production thermique annuelle de l'année de mesure et celle prévisionnelle obtenue à partir d'un fichier météorologique trentenaire (Figure 18).

Pour les sites n°1 à 3 le climat est sensiblement identique. Pour le site n°4, la saison de mesure a été relativement beaucoup plus chaude que celle prévue sur l'année trentenaire.

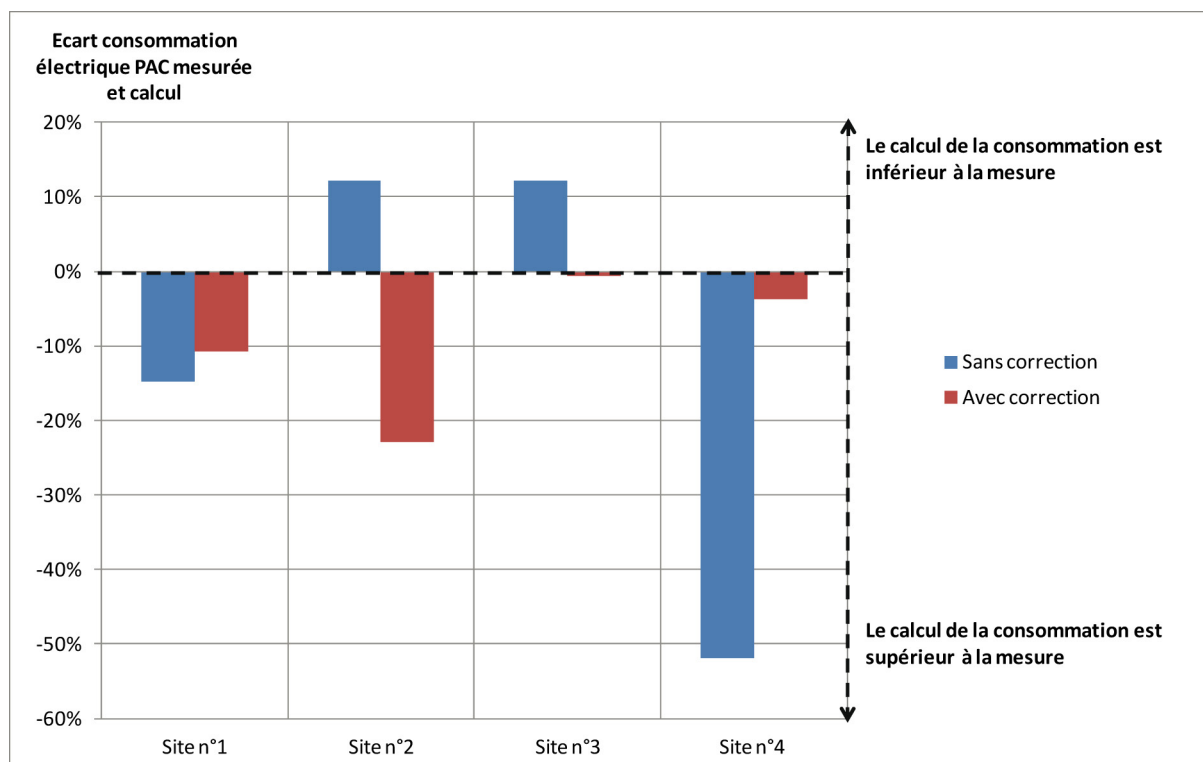
Pour les sites n°2 et n°3, le climat mesuré est donc plus rigoureux.

	Site n°1	Site n°2	Site n°3	Site n°4
Ecart du besoin thermique annuel mesuré avec le calcul effectué avec un fichier météorologique trentenaire	-4%	10%	13%	-46%

▲ Figure 18 : Ecart relatif entre production thermique annuelle mesurée et prévisionnelle

Pour nos études de cas, le niveau d'informations utilisé correspond au niveau intermédiaire avec la loi d'eau mesurée et avec les caractéristiques (puissance calorifique et COP) fournies par le fabricant. Ce niveau d'informations est à rapprocher des informations disponibles pour un professionnel qui assurerait le suivi de l'installation. En effet, la loi d'eau mesurée est proche de celle qui est programmée dans le régulateur de la pompe à chaleur.

Les résultats des écarts entre la mesure et la prévision de consommation électrique corrigée ou non (par la mesure du besoin thermique) pour chacun des sites sont présentés à la (Figure 19).



▲ Figure 19 : Ecart des prévisions (sans / avec) de la consommation de la pompe à chaleur à la mesure

Pour le site n°1, la correction climatique proposée a peu d'impact (la variation de besoin thermique annuel est faible).

Pour les sites n°2 et n°3, la prévision sans correction aurait conduit à sous estimer la consommation électrique de la pompe à chaleur de l'ordre de 12%. La correction permet de sur estimer la consommation réelle de l'ordre de 22% pour le site n°2 et de l'ordre de 1% pour le site n°3.

Pour le site n°4, la prévision sans correction de la consommation électrique de la pompe à chaleur aurait conduit à sur estimer de 50% la consommation réelle. Avec la correction, l'écart à la mesure se réduit à 3%.

Pour valider cette approche de correction, des mesures sur des sites pour des saisons plus froides et plus douces que celles de fichiers météorologiques trentenaires sont à rechercher.

D'autres méthodes de simplification des données d'entrées météorologiques peuvent être recherchées pour pouvoir ajuster facilement la consommation de la pompe à chaleur des aléas climatiques. En effet, la proposition de correction n'intègre pas la variabilité de la répartition annuelle des températures extérieures.

Limites et perspectives de l'étude

3



La robustesse d'un modèle mathématique de système de pompe à chaleur a été examinée à travers les résultats de quatre sites instrumentés.

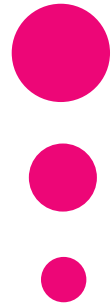
D'une part, il a été supposé qu'une « droite de déperditions » du bâtiment était caractérisable sur site. Par conséquent, la validité de l'intégration d'un modèle de pompe à chaleur dans un outil de simulation énergétique reste à examiner. En effet, la validité de la prévision sur la consommation électrique dépend de l'exactitude avec laquelle un professionnel peut estimer la puissance calorifique à fournir en fonction du climat.

D'autre part, cette étude et cette méthodologie mériteraient d'être étendues et reproduites pour d'autres installations, afin d'en consolider les enseignements et les conclusions.

Références

- EcoHVAC12 Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2 Lot 6 : Air-conditioning and ventilation systems Draft report of Task 4, Rivière et al., 2012.
- NF EN 12831, Systèmes de chauffage dans les bâtiments – Méthode de calcul des déperditions calorifiques de base, 2004.
- NF EN 14511, Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et la réfrigération des locaux.
- NF EN 14825, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling – Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance, 2012.
- NF EN 15316-4-2 Système de chauffage dans les bâtiments, Méthode de calcul des besoins énergétiques et des rendements des systèmes, Partie 4-2 : Systèmes de génération de chauffage des locaux, systèmes de pompes à chaleur.
- NF EN 15603 Performance énergétique des bâtiments, consommation globale d'énergie et définition des évaluations énergétiques, 2008.
- Les pompes à chaleur avec Inverter, rapport, programme Règle de l'Art Grenelle Environnement 2012, Septembre 2013.
- Schémathèque de pompes à chaleur en habitat individuel, guide, programme Règle de l'Art Grenelle Environnement 2012, Octobre 2013.
- Suivi métrologique de 10 maisons individuelles équipées d'une pompe à chaleur haute température fonctionnant en substitution de chaudière, financement ADEME, J. Caillet et al (COSTIC), 2012.
- Réglementation thermique 2012.

Annexes



Annexe 1 : modèle mathématique du module de pompe à chaleur

Annexe 2 : présentation synthétique des sites



ANNEXE 1 : MODÈLE MATHÉMATIQUE DU MODULE DE POMPE À CHALEUR

Les différents modèles mathématiques utilisés sont présentés dans cette annexe.

Le modèle de pompe à chaleur proposé s'appuie sur un modèle :

- A pleine charge ;
- A charge partielle.

Une déclinaison de ce modèle générique est également proposée pour une pompe à chaleur à deux étages de puissance.

La modélisation de l'appoint électrique et du réseau hydraulique de distribution sont également proposées dans cette annexe.

Méthode de calcul : méthode par « bin » et méthode horaire

Une méthode « bin » peut également être utilisée pour évaluer la consommation. Par exemple, à l'échelle d'une pompe à chaleur, la méthode « bin » consiste à décomposer le temps de fonctionnement total en intervalles appelés « bin » correspondant à différentes charges partielles. Un modèle de performance de la pompe à chaleur permet alors d'évaluer une consommation annuelle.

Le deuxième type de méthode consiste à réaliser une évaluation horaire. C'est le cas des outils s'appuyant sur le moteur de calcul de la réglementation thermique 2012.

Modèle à pleine charge d'une pompe à chaleur

Lorsqu'un unique point de fonctionnement est utilisé (+7°C extérieur / 35°C sur l'eau), les caractéristiques à pleine charge de 3 autres points de fonctionnement peuvent être déterminés à l'aide des coefficients de correction fournis dans le tableau suivant.

Td	Td=35		Td=50	
Text	PC	COP	PC	COP
-7	0,689	0,683	0,655	0,513
2	0,844	0,842	0,815	0,632
7	1,000	1,000	0,969	0,747
15	1,222	1,198	1,166	0,881

▲ Coefficients de régression de la puissance calorifique et du COP de la pompe à chaleur

Les points de fonctionnement intermédiaires sont alors interpolés.



Modèle de charge partielle d'une pompe à chaleur fonctionnant en tout ou rien ou en Inverter

Le taux de charge de la PAC s'écrit (Part Load Ratio en anglais (PLR)) :

$$PLR = \frac{P_{thPLR}}{P_{thpc}}$$

Avec P_{thpc} la puissance calorifique disponible de la pompe à chaleur à pleine charge dans les conditions de fonctionnement (température de départ, température extérieure) et avec P_{thPLR} la puissance à apporter au réseau de chauffage.

Pour une pompe à chaleur fonctionnant uniquement en tout ou rien, la plage de modulation de vitesse n'existe pas.

Une PAC Inverter (c'est-à-dire à variation de vitesse du compresseur) peut fonctionner dans deux plages :

- Dans la plage de modulation de vitesse, la vitesse du compresseur est adaptée ;
- Dans la plage de fonctionnement en tout ou rien : le compresseur cycle entre le mode marche et le mode arrêt.

Cas du fonctionnement dans la plage de modulation de vitesse

Dans la plage de régulation de la variation de vitesse admissible par la pompe à chaleur, la performance de la pompe à chaleur s'écrit d'après le rapport EcoHVAC12

$$COP_{PLR} = COP_{pc} \left(1 + (PLF_{min} - 1) \frac{1 - PLR}{1 - PLR_{min}} \right)$$

Avec PLR_{min} la valeur minimale du taux de charge thermique à partir de laquelle le compresseur fonctionne en continu, PLF_{min} le facteur de correction de performance à charge partielle obtenu pour la charge partielle PLR_{min} , et COP_{pc} le coefficient de performance à pleine charge pour les mêmes conditions de fonctionnement d'entrée d'eau et d'entrée d'air qu'à charge partielle.



Cas de la plage de fonctionnement en tout ou rien (mode actif)

En dehors de la plage de régulation de la variation de vitesse admissible par la PAC, la performance de la PAC s'écrit dans la norme NF EN 14825 :

$$COP_{PLR} = COP_{pc} PLF_{min} \frac{PLR/PLR_{min}}{\left(\frac{PLR}{PLR_{min}} C_c + (1 - C_c) \right)}$$

Avec C_c le coefficient de dégradation à charge partielle dû aux puissances résiduelles de veille (régulateur, résistance de carter).

Dans le cas d'une PAC fonctionnant uniquement en tout ou rien :

$$\begin{cases} PLF_{min} = 100\% \\ PLR_{min} = 100\% \end{cases}$$

Pour une PAC avec régulation de vitesse du compresseur, par défaut de valeurs obtenues par des essais, les valeurs par défaut proposées dans la Réglementation Thermique 2012 sont les suivantes :

$$\begin{cases} PLR_{min} = 40\% \\ PLF_{min} = 100\% \end{cases}$$

Le coefficient C_c est mesuré dans les conditions de NF EN 14825 par l'équation suivante :

$$C_c = 1 - \frac{P_{arrêt}}{P_{pac\ pc}}$$

Pour cette approche normative, ce coefficient représente la consommation de veille de la machine (principalement le régulateur et la résistance de carter).

Selon NF EN 14825, ce coefficient est mesuré pour les différentes conditions d'essais à charge partielle. Par défaut de mesures, la valeur proposée dans NF EN 14825 pour le coefficient C_c est de 90%. Notons que ce coefficient n'est, à notre connaissance, pas encore mesuré même sur les modèles les plus récents.

Pour atteindre une température moyenne en sortie, si la PAC fonctionne en tout ou rien, la température délivrée par la PAC doit être supérieure à cette température moyenne. Par conséquent, si la puissance à l'arrêt de la PAC est utilisée pour le calcul de C_c , il peut être envisageable de réduire le coefficient d'arrêt pour prendre en compte la perte de performance due à la différence entre la température de sortie de la PAC et la température moyenne à fournir.

Régulation bi-étagée d'une pompe à chaleur tout ou rien

Dans le cas où la PAC possède deux étages de puissance régulé en tout ou rien, si la puissance calorifique disponible du premier étage de puissance n'est pas suffisante, le deuxième étage est activé.

Cette régulation est modélisée sur une heure à l'aide du système d'équation suivant :

$$\begin{cases} C_{elec} = P_{elec \text{ étage } 1} t_1 + P_{elec \text{ étage } 2} t_2 \\ P_{th \text{ étage } 1} t_1 + P_{th \text{ étage } 2} t_2 = B_{th} \\ 1 = t_1 + t_2 \end{cases}$$

Avec C_{elec} la consommation électrique de la PAC pour une heure (kWh) ; $P_{elec \text{ étage } 1}$ et $P_{elec \text{ étage } 2}$ la puissance électrique appelée à pleine charge de la PAC respectivement pour le premier étage de puissance et le second étage de puissance (kW) ; $P_{th \text{ étage } 1}$ et $P_{th \text{ étage } 2}$ la puissance calorifique disponible de la PAC respectivement pour le premier étage de puissance et le second étage de puissance (kW) ; B_{th} le besoin thermique horaire (kWh) ; t_1 et t_2 le temps de fonctionnement respectivement pour le premier étage de puissance et pour le seconde étage de puissance (heure).

Modélisation d'une correction du COP en fonction de la température au condenseur

La méthode de correction exergetique proposée dans NF EN 14825 est intégrée au modèle de PAC par la relation suivante :

$$COP_{\Delta\theta} = COP_{standard} \left[1 - \frac{\frac{\Delta\theta_{standard} - \Delta\theta_{opr}}{2}}{T_{sk} - \frac{\Delta\theta_{standard}}{2} + \Delta T_{sk} - (T_{sc} - \Delta T_{sc})} \right]$$

Avec $\Delta\theta_{standard}$ la différence de température sur l'eau au condenseur issue des essais, $\Delta\theta_{opr}$ la valeur la différence de température sur l'eau au condenseur à fournir pour la puissance des émetteurs, T_{sk} la température du fluide au condenseur, T_{sc} la température extérieure.

De plus, il est supposé que la différence moyenne de température entre l'air et le fluide frigorigène à l'évaporateur ΔT_{sk} et la différence moyenne de température entre l'eau et le fluide frigorigène au condenseur ΔT_{sc} :

$$\Delta T_{sk} = 4K$$

$$\Delta T_{sc} = 15K$$



Modélisation de l'appoint électrique (mode « actif »)

La PAC fonctionne en mode bivalent : il est considéré que la pompe à chaleur continue de fonctionner lorsque le chauffage d'appoint s'enclenche. Ainsi, lorsque pour une classe de température donnée (i), la puissance calorifique de la pompe à chaleur (P_{Ci}) est inférieure aux besoins du bâtiment (B_i), la puissance électrique consommée par le chauffage d'appoint (P_{app_i}) s'écrit comme la différence entre ces deux puissances.

$$\begin{cases} P_{app_i} = B_i - P_{C_i} \text{ si } B_i > P_{C_i} \\ P_{app_i} = 0 \text{ si } B_i \leq P_{C_i} \end{cases}$$

Modélisation de la veille des équipements (mode « stand-by »)

L'utilisation des modèles mathématiques précédents implique que si aucun besoin thermique n'est requis, la PAC n'appelle aucune puissance électrique. Or, le régulateur et la résistance de carter peuvent continuer à fonctionner.

Pour connaître la consommation totale du système, il est donc nécessaire d'ajouter la consommation en veille de la PAC à celle calculée avec le modèle mathématique précédent.

La consommation totale électrique de la PAC s'écrit donc :

$$C_{elec\ tot} = C_{elec\ active} + C_{elec\ veille}$$

La consommation électrique active est calculée à partir du modèle décrivant les caractéristiques de la PAC en utilisant soit la méthode de calcul par intervalle de température extérieure, soit la méthode de calcul horaire.

La consommation électrique de veille est calculée comme suit :

$$C_{elec\ veille} = P_{elec\ veille} (t_{tot} - t_{fonctionnement})$$

Avec $P_{elec\ veille}$ la puissance des composants restant toujours en fonctionnement, t_{tot} la durée pendant laquelle les équipements sont allumés, et avec $t_{fonctionnement}$ la durée de fonctionnement pour laquelle les équipements produisent de la chaleur.

Modélisation du réseau de distribution

La puissance d'un émetteur peut être modélisée par la relation suivante :

$$P = P_{50} \left(\frac{\overline{T_{\text{émetteur}}} - T_{\text{air}}}{50} \right)^n$$

Avec $\overline{T_{\text{émetteur}}}$ la température d'eau moyenne dans l'émetteur (moyenne entre la température en entrée et en sortie), T_{air} la température ambiante, P_{50} la puissance émise par l'émetteur pour un écart entre la température d'eau moyenne dans l'émetteur et la température d'air de 50°C et n est un coefficient dépendant du type d'émetteur (généralement pris égal à 1,3 dans le cas des radiateurs à eau chaude).

Un bipasse ou une bouteille de découplage fonctionnant en découplage (débit primaire supérieur au secondaire) peut être modélisé par le bilan suivant :

Si le débit primaire est supérieur au débit secondaire alors :

$$\begin{cases} q_{\text{primaire}} T_{\text{départ primaire}} = q_r T_{\text{départ primaire}} + q_{\text{secondaire}} T_{\text{départ primaire}} \\ q_{\text{primaire}} T_{\text{retour primaire}} = q_r T_{\text{départ primaire}} + q_{\text{secondaire}} T_{\text{retour secondaire}} \end{cases}$$

Avec q_{primaire} , $q_{\text{secondaire}}$ et q_r respectivement le débit sur le réseau primaire, sur le réseau secondaire, et le débit recyclé vers le primaire ; et avec $T_{\text{départ primaire}}$, $T_{\text{retour primaire}}$ et $T_{\text{retour secondaire}}$ la température respectivement de départ primaire, de retour primaire et de retour secondaire.



ANNEXE 2 : PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES SITES

Les sites :

		Site n°1	Site n°2	Site n°3	Site n°4
Conception de l'installation	Appoint électrique	Oui	Oui	Oui	Non
	Production d'ECS	Non	Non	Non	Oui
	Volume tampon / organe de découplage	Oui, bouteille	Oui, volume tampon en série puis bipasse	Non	Oui, volume tampon de faible capacité en série
	Type d'émetteurs	Radiateurs	Radiateurs	Planchers	Radiateurs
	Référence schémathèque PAC Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012	Type n°3	Type n°3	Type n°1	Type n°1
	Dimensionnement de la PAC pour le chauffage à Tbase (Pdisponible / Pnécessaire mesurée)	94%	220%	65%	138%
Exploitation	Régulation de la température de départ	Correcte	Correcte	Non optimisée	Non effectuée
Climat	Période de mesures	Janvier à Février	Novembre à Novembre	Janvier à Janvier	Janvier à Janvier
	Localisation	Picardie	Pays de la Loire	PACA	Haute Normandie
	Nombre de DJU mesuré	2263	2380	1410	2340
	Nombre de DJU fichier trentenaire	2805	2392	1425	2918
Performance intrinsèque	Technologie de modulation de puissance	TOR	TOR avec 2 compresseurs	TOR	Variation de vitesse
	COP normatif (35°C eau / 7°C ext)	3,8	3,4	4,0	3,72
	COP constructeur haute température sur l'eau / 7°C extérieur)	2,0 à 65°C	2,9 à 50°C	-	2,88 à 65°C

PARTENAIRES du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ;
- Association des industries de produits de construction (AIMCC) ;
- Agence qualité construction (AQC) ;
- Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (CAPEB) ;
- Confédération des organismes indépendants de prévention, de contrôle et d'inspection (COPREC Construction) ;
- Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) ;
- Électricité de France (EDF) ;
- Fédération des entreprises publiques locales (EPL) ;
- Fédération française du bâtiment (FFB) ;
- Fédération française des sociétés d'assurance (FFSA) ;
- Fédération des promoteurs immobiliers de France (FPI) ;
- Fédération des syndicats des métiers de la prestation intellectuelle du Conseil, de l'Ingénierie et du Numérique (Fédération CINOVA) ;
- GDF SUEZ ;
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie ;
- Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement ;
- Plan Bâtiment Durable ;
- SYNTec Ingénierie ;
- Union nationale des syndicats français d'architectes (UNSA) ;
- Union nationale des économistes de la construction (UNTEC) ;
- Union sociale pour l'habitat (USH).

Les productions du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.



CONSOMMATIONS ET PERFORMANCES RÉELLES DES POMPES À CHALEUR

JUIN 2014

La consommation d'un système contenant une pompe à chaleur dépend de multiples facteurs. L'objectif de cette étude est d'examiner la pertinence de ces facteurs pour formuler un cahier des charges d'un outil de modélisation. Ce cahier des charges vise à optimiser le nombre d'entrées pertinentes en fonction de l'avancement d'un projet d'installation d'une pompe à chaleur par un professionnel.

Dans un premier temps, les résultats donnés par le modèle proposé ont été analysés sur la base de quatre installations réelles ayant fait l'objet d'un suivi instrumenté sur une année. Ces analyses montrent que certaines données du modèle impactent peu sur l'estimation de la consommation de la pompe à chaleur.

Dans un second temps, les données les plus pertinentes sont rassemblées pour constituer différents niveaux d'informations. Les analyses montrent que, pour les machines contrôlées en tout ou rien, le modèle proposé permet d'estimer la consommation électrique de la pompe à chaleur de manière satisfaisante avec une quantité d'informations limitée. Mais dans le cas d'un compresseur à vitesse variable, une estimation fiable n'est obtenue qu'avec des données difficilement mesurables pour un professionnel (notamment le modèle d'évolution des performances en fonction du taux de charge).



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

