



PERFORMANCE POMPES A CHALEUR : REALISATION D'UNE CAMPAGNE DE MESURE SUR DES POMPES A CHALEUR EN RESIDENTIEL INDIVIDUEL

Mesure des performances sur le terrain,
préconisations à l'ensemble de la filière,
comparaison européenne



EXPERTISES

Rapport final

Sept.
2025

REMERCIEMENTS

Merci aux participants aux comités techniques et aux personnes ayant apporté leur contribution dans les réflexions.

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Enertech, Muriel DUPRET, Uwe BRAMKAMP. 2025. Performance Pompes à chaleur : réalisation d'une campagne de mesure sur des pompes à chaleur en résidentiel individuel. 227 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2023MA000127

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME et de la DGEC par : Enertech, Muriel DUPRET, Uwe BRAMKAMP

Coordination technique - ADEME : LARUELLE Céline, LOUIS Jonathan

Direction/Service : DVTD / SB

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	7
CONTEXTE DU PROJET	8
SIGLES ET ACRONYMES.....	9
PARTIE 1 : DESCRIPTION DE L'ECHANTILLON ET DE LA METROLOGIE	11
1. DESCRIPTION DU PROCESSUS DE RECRUTEMENT DE L'ECHANTILLON	11
1.1. Rappel du cahier des charges	11
1.2. Source d'obtention des contacts	11
1.2.1. Fichier des opérations CEE (Ministère)	11
1.2.2. Autres contacts	11
1.3. Principe général du recrutement.....	11
1.4. Sélection des 20 zones de recrutement	12
1.4.1. Critères de sélection.....	12
1.4.2. Zones sélectionnées	13
1.5. Processus de recrutement	15
1.6. Planning de recrutement et d'instrumentation	15
2. STRATEGIE D'INSTRUMENTATION ET METROLOGIE DEPLOYEE	16
2.1. Objectif général	16
2.2. Système de mesure	17
2.3. Description de l'instrumentation	21
2.3.1. Actions réalisées dans tous les logements	21
2.3.2. Principe de pose des capteurs de courant	22
2.3.3. Principe de pose des compteurs de chaleur	22
2.3.2. Principe de pose des stations météo	24
2.3.3. Principe de suivi des captages géothermiques	25
2.3.4. Quantité de capteurs déployés sur le terrain	25
3. CARACTERISATION DE L'ECHANTILLON DE 100 LOGEMENTS.....	26
3.1. Les foyers participants	26
3.1.1. Répartition géographique	26
3.1.2. Numérotation des logements.....	27
3.1.3. Composition des foyers.....	27
3.1.4. Abonnement électrique	28
3.2. Les logements.....	29
3.2.1. Méthodologie.....	29
3.2.2. Caractéristiques générales des logements.....	32
3.2.3. Déperdition et performance thermique du bâti	36
3.3. Les pompes à chaleur	41
3.3.1. PAC Air/eau	41
3.3.2. PAC Eau/eau	42

3.3.3.	Fluides frigorigènes	44
3.3.4.	Configurations hydrauliques.....	45
3.3.5.	Anomalies rencontrées sur site	47
3.3.6.	Niveau de calorifuge des installations	51
3.3.7.	Emetteurs de chaleur	51
3.3.8.	Régulation terminale	54
3.3.9.	Production d'eau chaude sanitaire.....	54
3.3.10.	PAC connectées.....	55
3.3.11.	Fabricants	56
3.3.12.	Autres moyens de chauffage.....	58
3.3.13.	Systèmes de climatisation/rafraichissement.....	58
3.3.14.	Puissance acoustique des unités extérieures des PAC air/eau	60
3.3.15.	Comparaison des SCOP fabricant.....	62
3.4.	Le contexte d'installation des PAC de l'échantillon.....	66
3.4.1.	Mode de chauffage avant travaux	66
3.4.2.	Date d'installation des PAC.....	66
3.4.3.	Puissance des PAC et dimensionnement	67
3.4.4.	Analyse des coûts.....	73
3.4.5.	Usage par l'occupant.....	78
3.4.6.	Maintenance des installations	78
3.4.7.	Satisfaction de l'occupant	79
	PARTIE 2 : RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE MESURES	81
1.1.	Période de mesure de chaque logement.....	81
1.2.	Rigueur de l'hiver durant la période de mesure	81
1.3.	Illustration de la méthode d'analyse des données employée.....	82
1.3.1.	Détermination des consommations de chaleur et d'électricité	82
1.3.2.	Détermination des COP.....	84
1.3.3.	Introduction du COP et du facteur de Carnot	85
	2. RESULTATS SUR LE CHAUFFAGE	86
2.1.	SCOP chauffage	86
2.1.1.	Résultats généraux de la campagne de mesures	86
2.1.2.	Comparaison avec le SCOP fabricant (ERP).....	88
2.1.3.	Paramètres explicatifs des SCOP chauffage mesurés.....	89
2.1.3.1.	Le SCOP de Carnot et l'efficacité par rapport à Carnot	89
2.1.3.2.	Température de production du chauffage.....	94
2.1.3.3.	Température de la source froide	99
2.1.3.4.	Part des résistances d'appoint et des consommations hors production	101
2.1.3.5.	Cyclage de certaines PAC.....	102
2.1.3.6.	Consommation électrique hors production.....	105
2.1.3.7.	Hydraulique des installations (débits, circulateurs, ΔT)	107
2.1.3.7.1.	Détermination des consommations des circulateurs.....	107
2.1.3.7.2.	Paramètres explicatifs de la consommation des circulateurs.....	109
2.1.3.7.3.	Conclusion sur l'étude des circulateurs.....	114
2.1.4.	Recherche de corrélation du SCOP chauffage mesuré	115
2.1.4.1.	Corrélations du premier ordre	115
2.1.4.2.	Corrélations du second ordre.....	117
2.1.4.3.	Corrélation avec la zone climatique, le type d'émetteur, le niveau d'isolation	119
2.1.4.4.	Focus sur les PAC monobloc au R290	122

2.2.	Besoins de chaleur et consommations du chauffage.....	123
2.2.1.	Températures ambiantes mesurées	123
2.2.2.	Besoins de chaleur pour le chauffage	125
2.2.3.	Consommations d'électricité pour le chauffage	127
2.2.3.1.	Présentation des résultats.....	127
2.2.3.2.	Thermosensibilité des consommations électriques et des COP	129
2.2.3.3.	Vague de froid du 20 janvier 2024 vue du réseau	130
2.2.3.4.	Courbe de charge électrique vue du réseau sur l'hiver	132

3. RESULTATS SUR L'EAU CHAUDE SANITAIRE 133

3.1.	SCOP eau chaude sanitaire	133
3.1.2.	Paramètres explicatifs des SCOP ECS mesurés	135
3.1.2.1.	Le SCOP de Carnot et l'efficacité par rapport à Carnot	135
3.1.2.2.	Température de production de l'ECS	139
3.1.2.3.	Part des résistances d'appoint et des consommations hors production	140
3.1.3.	Recherche de corrélation du SCOP ECS mesuré	142
3.2.	Besoins de chaleur et consommations de l'eau chaude sanitaire	143
3.2.1.	Besoins de chaleur pour l'eau chaude sanitaire	143
3.2.2.	Comparaison des besoins de chaleur du chauffage et de l'eau chaude sanitaire.....	146
3.2.3.	Consommations d'électricité pour l'eau chaude sanitaire.....	147
3.2.4.	Comparaison des consommations électriques du chauffage et de l'eau chaude sanitaire	149

4. RESULTATS SUR LE RAFRAICHISSEMENT 149

5. PART DE LA POMPE A CHALEUR DANS LE GENERAL ELECTRIQUE... 153

6. TEMPS DE RETOUR FINANCIER D'UNE PAC 154

PARTIE 3 : CONFRONTATION DES MESURES A LA REGLEMENTATION ET AUX AUTRES CAMPAGNES EUROPEENNES 158

1.1.	Rappel sur le calcul 3CL	158
1.1.1.	Bases du calcul 3CL pour déterminer le besoin de chauffage	158
1.1.2.	Prise en compte des apports gratuits	161
1.2.	Comparaison du besoin de chauffage du calcul 3CL à la mesure	163
1.2.1.	Ecart constatés.....	163
1.2.2.	Facteurs explicatifs	164
1.2.2.1.	Focus sur les Degrés-heures.....	164
1.2.2.2.	Conclusion sur les paramètres explicatifs	166
1.3.	Comparaison du SCOP du calcul 3CL à la mesure	166
1.3.1.	Ecart constatés.....	166
1.3.2.	Explication des écarts entre SCOP mesuré et SCOP par défaut du DPE	168

2. COMPARAISON A LA REGLEMENTATION EUROPEENNE (ERP) 169

2.1.	Rappel sur l'ERP.....	169
2.2.	Comparaison du SCOP ERP et du SCOP mesuré	172
2.2.1.	Ecart constatés.....	172
2.2.2.	Facteurs explicatifs	173
2.2.2.1.	Focus sur la loi d'eau	175
2.2.2.2.	Focus sur le nombre d'heures de la saison de chauffe et la température extérieure	176

2.2.2.3. Focus sur le facteur de cyclage et de modulation	178
2.3. Conclusion.....	183
3. AUTRES CAMPAGNES DE MESURES EUROPEENNES	184
3.1. Fraunhauser et autres sources allemandes	184
3.1.1. Les logements et les installations	187
3.1.2. Les performances mesurées.....	189
3.2. Autres références	194
SYNTHESE DU PROJET	196
4. ANNEXES	205
4.1. Caractéristiques des 100 sites instrumentés	205
4.2. Courrier postal d'invitation	209
4.3. Courrier électronique de relance	209
4.4. Questionnaire en ligne de manifestation d'intérêt	211
4.5. Questionnaire rempli avec l'occupant durant l'instrumentation	217
4.6. Formulaire RGPD.....	218
4.7. Formulaire Linky.....	220
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	221

RÉSUMÉ

Les travaux récents de prospective visant la neutralité carbone à l'horizon 2050 en France soulignent unanimement l'importance cruciale de la transition énergétique dans le secteur du bâtiment. Une comparaison des scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME, du Plan de Transformation de l'Économie Française du Shift Project, et du scénario négaWatt, pilotée par l'ADEME, a révélé une forte convergence sur la nécessité de rénover le parc existant à un rythme et à un niveau de performance très élevés. Parallèlement, les vecteurs énergétiques utilisés, notamment pour le chauffage, doivent être décarbonés, et la sortie des énergies fossiles doit être orchestrée.

La pompe à chaleur est un outil central de cette décarbonation et est actuellement soutenue par les politiques publiques, notamment MaPrimeRénov', ainsi que par des dispositifs financés par des fonds privés comme les Certificats d'Économies d'Énergie.

Cependant, la performance d'une PAC est plus sensible que celle d'un générateur conventionnel. Elle dépend de nombreux paramètres, notamment des températures de la production de chaleur et de la source froide. Pour éclairer le débat sur leur performance réelle dans les logements, il est essentiel d'évaluer leur fonctionnement en conditions réelles tout en évaluant la qualité de mise en œuvre des installations.

Cette étude pilotée par l'ADEME vise à recueillir des données de terrain grâce à l'audit et l'instrumentation de 100 PAC en maisons individuelles, posées en remplacement d'une chaudière. Elle permet en particulier de mesurer les coefficients de performance réels des PAC air-eau et eau-eau et d'en étudier les principaux paramètres d'influence.

Les résultats à cet égard sont très satisfaisants pour le chauffage, avec des valeurs moyennes de COP saisonniers mesurés de 2,9 pour les PAC air/eau et 4,3 pour les PAC eau/eau.

La grande variabilité des résultats entre les logements attire néanmoins l'attention sur des dysfonctionnements et des marges d'amélioration significatives, mais aussi sur des performances parfois spectaculaires avec des COP saisonniers supérieurs à 4 pour certaines PAC air/eau et à 7 pour une PAC eau/eau, qui fixent un horizon prometteur.

Le COP saisonnier des PAC air/eau dépend en premier lieu de la température de production : les installations sur plancher bénéficient d'une performance en moyenne 30% supérieures à celles sur radiateurs. L'influence de la zone climatique est aussi manifeste pour les PAC air/eau avec une amélioration du COP saisonnier de 30% entre la zone H1 et la zone H3. Fait marquant dans la campagne, les machines restent performantes en cas de vague de froid : un COP moyen de 2 a été mesuré le 20 janvier 2024 à l'échelle de l'échantillon à une température moyenne de -4°C.

L'analyse des résultats n'a en revanche pas mis en évidence de lien direct entre le COP des PAC et la performance du bâti : des bons COP saisonniers ont été constatés dans des maisons peu isolées alors que des COP moyens ont été mesurés dans des maisons bien isolées. Ainsi, ces résultats confirment qu'avec des émetteurs adaptés, ne nécessitant pas une boucle d'eau chaude haute température (<55°C), la PAC est une solution performante même pour les logements mal isolés.

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique des installations (on estime que le COP pourrait être amélioré d'un point en moyenne), plusieurs recommandations sont formulées : meilleure maîtrise du réglage des lois d'eau (sujet prioritaire), limitation du cyclage via une amélioration de la régulation chez certains fabricants et une meilleure mise en œuvre hydraulique, réduction des consommations hors production (veille des équipements et fonctionnement permanent d'auxiliaires), meilleure mise en œuvre des bouteilles de découplage et des circulateurs, optimisation des programmations horaires, généralisation et amélioration des opérations de maintenance.

Concernant l'eau chaude sanitaire les résultats sont plus mitigés, avec un COP saisonnier moyen de production de 2,0 pour les PAC air/eau et de 2,3 pour les eau/eau. Des pistes d'économies claires sont identifiées, telles que la limitation des consommations électriques hors production (veilles en particulier), le meilleur paramétrage des résistances d'appoint, une maîtrise plus fine des températures de consigne ainsi qu'une optimisation des programmations horaires. La proposition de volumes de stockages ECS plus faibles par les fabricants permettrait également d'améliorer les performances.

L'ensemble des données de terrain recueillies permettent d'estimer que le surcoût du choix d'une PAC par rapport à une chaudière gaz est globalement amorti en deux ans après déduction des aides, et en six ans sans déduction, avec les coûts actuels de l'énergie.

Cette étude met donc en évidence le très grand potentiel des PAC pour améliorer l'efficacité énergétique et la décarbonation des logements sur le territoire. Des pistes concrètes sont proposées pour en optimiser et en sécuriser les performances, ce qui permettra d'éviter les contre-références et de bénéficier pleinement du potentiel de cette technologie.

Contexte du projet

Les travaux de prospective récents visant la neutralité carbone à 2050 sont unanimes sur l'importance de la transition énergétique du secteur du bâtiment. Un travail de comparaison piloté par l'ADEME¹ des scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME, du Plan de Transformation de l'Economie Française du Shift Project, ou encore du scénario négaWatt a montré une forte convergence sur le besoin de rénover le parc existant à un rythme et à un niveau de performance très importants. Dans le même temps, les vecteurs énergétiques utilisés notamment pour le chauffage doivent être décarbonés et la sortie des énergies fossiles orchestrée.

La pompe à chaleur (PAC) est un des outils centraux de la décarbonation du chauffage, et en tant que tel il est actuellement soutenu par les politiques publiques (notamment MaPrimeRénov') et dispositifs financés par des fonds privés (CEE). Avec succès, puisqu'en 2021 ce sont 84 000 gestes de mise en œuvre de pompes à chaleur qui ont été réalisés² dans le cadre de MaPrimeRénov'.

Cependant le niveau de performance atteint avec les pompes à chaleur dépend de nombreux paramètres, et en premier lieu du niveau de température de la production de chaleur (lui-même fonction de la puissance d'émission souhaitée et du type d'émetteur – radiateur, plancher, etc.) et du niveau de température de la source froide (météo ou température du sol). Afin d'éclairer le débat sur le niveau de performance des pompes à chaleur dans les logements, il est donc intéressant d'évaluer la performance en conditions réelles et d'en identifier les principaux facteurs d'influence, parmi lesquels la qualité de l'installation, les réglages, la régulation, etc.

Par ailleurs, il est compliqué pour les ménages de bénéficier d'un conseil technique précis sur la pertinence d'installer une pompe à chaleur, car l'outil le plus utilisé pour apporter ces conseils, le nouveau DPE, prend en compte un coefficient de performance (COP) saisonnier normalisé (SCOP), qui ne tient pas compte des réglages réellement mis en œuvre dans le logement.

Enfin, malgré l'existence de référentiels techniques à destination de la filière professionnelle³, il est constaté sur le terrain une grande hétérogénéité dans la qualité des installations (dimensionnement, mise en œuvre, réglages), qui se traduit par des performances très variables même si le résultat moyen est en lui-même satisfaisant.

Ainsi un écart important peut être constaté in fine par les particuliers entre la « promesse » d'économies avant travaux et la réalité. Il est donc important, dans le cadre du déploiement massif des pompes à chaleur air/eau sur le territoire, d'analyser finement le fonctionnement des installations sur le terrain en vue de proposer des axes d'améliorations à l'ensemble de la filière (fabricants, prescripteurs, installateurs) ainsi qu'aux utilisateurs. Ces résultats viendront enrichir de manière significative les études existantes au niveau national⁴ et européen⁵.

Par la présente étude, l'ADEME vise à recueillir des données de terrain par l'audit et l'instrumentation de 100 pompes à chaleur posées en rénovation de chaudières en maison individuelle et réparties dans tout le territoire, de manière à produire une photographie exhaustive des conditions de mise en œuvre de ces équipements ainsi que des performances réelles atteintes et des économies générées.

Elle vise en particulier à documenter les coefficients de performances (COP) réels des pompes à chaleur air-eau et eau-eau. Ces COP seront déterminés par des mesures fines (électricité, chaleur) au pas de temps de la minute sur 100 installations. L'impact des différents paramètres qui influent sur le COP sera étudié.

Cette étude a permis d'une part de mieux comprendre le fonctionnement en conditions réelles des pompes à chaleurs, d'autre part d'identifier des axes d'améliorations sur leurs conditions de mise en œuvre et d'exploitation de cet

¹ <https://www.enertech.fr/comparaison-des-scenarii-ademe-negawatt-shift-et-pouget-carbone4-sur-le-batiment/>

² <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-suivi-de-la-renovation-energetique-dans-le-secteur-residentiel>

³ Pompe à chaleur, 12 enseignements à connaître (AQC, avril 2022) : <https://qualiteconstruction.com/publication/pompe-a-chaleur-en-renovation-12-enseignements-a-connaître/>

⁴ Etudes : *Perf in Mind* (Enertech, Effinergie, Institut négaWatt et Médiéco, avec le soutien de l'ADEME) : <https://www.effinergie.org/web/perfinmind> ; *Perf In Mind 2* (en cours) ; *Essais de performance de pompes à chaleur air/eau* (EDF R&D avec le soutien de l'Ademe).

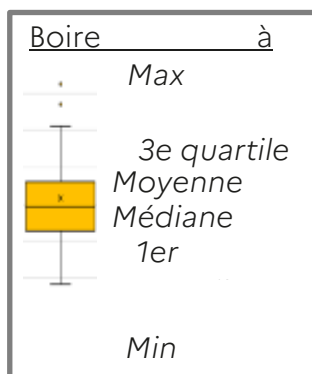
⁵ *Etude Pompes à chaleur dans des bâtiment existants, résultat du projet de recherche, pompe à chaleur smart dans l'existant*, 23/07/2020, du Fraunhofer ISE à Fribourg en Allemagne ; *Interim insights from heat pump performance data* et *Interim heat pump performance data analysis report*, 2023, de Catapult Energy Systems au Royaume Uni.

équipement qui, utilisé à bon escient, constitue un levier important de la transition énergétique et bas carbone du secteur du bâtiment.

SIGLES ET ACRONYMES

CH	Chauffage
COP	Coefficient de performance (d'une pompe à chaleur)
COP Carnot	Coefficient de performance du cycle de Carnot
DPE	Diagnostic de performance énergétique
ECS	Eau chaude sanitaire
EER	Energy efficiency ratio : coefficient d'efficacité frigorifique. Equivalent du COP pour la production de froid.
EHP	Electricité hors production : consommation électrique de la pompe à chaleur en dehors de toute période de production chauffage ou ECS
ERP	Energy-related Product (directive Ecodesign) : directive européenne qui vise à réduire les impacts environnementaux des produits mis sur le marché.
f	Facteur de Carnot, ou efficacité par rapport à Carnot
HT	Haute température : une PAC est dite « haute température » lorsqu'elle est capable de produire de la chaleur à une température supérieure ou égale à 65°C
PAC	Pompe à chaleur
SCOP	Coefficient de performance saisonnier (évalué sur une année de mesure)
SEER	Seasonal energy efficiency ratio : coefficient d'efficacité frigorifique saisonnier. Equivalent du SCOP pour la production de froid
SHAB	Surface habitable NB : les surfaces utilisées dans ce document sont systématiquement les surfaces habitables
SPF	Seasonal performance factor : équivalent du SCOP ou du SEER. L'indice numérique adossé à cet acronyme (SPF1,2,3 ou 4) définit le périmètre d'auxiliaires électriques pris en compte dans le bilan. Exemple : SPF4 = tous auxiliaires inclus / SPF3 = hors circulateurs de charge et de distribution
THT	Très haute température : une PAC est dite « très haute température » lorsqu'elle est capable de produire de la chaleur à une température supérieure ou égale à 70°C
TRI	Temps de retour sur investissement
Ue	Unité extérieure (ici d'une pompe à chaleur air/eau)
Ui	Unité intérieure (ici d'une pompe à chaleur air/eau ou eau/eau)

Boite à moustache : forme de graphique représentant des données statiques d'un échantillon : dans ce rapport nous représentons la moyenne, la médiane (valeur qui divise l'échantillon en 2 ensembles de nombre de valeurs égales), 1^{er} et 3^e quartile (valeurs divisant l'échantillon respectivement au quart et aux trois-quarts en nombre de valeurs), minimum et maximum. Cette représentation permet de montrer de façon compacte la répartition statistique de la grandeur observée.



Commentaire sur les points au-delà des min/max : <https://www.stat4decision.com/fr/le-box-plot-ou-la-fameuse-boite-a-moustache/>

PARTIE 1 : DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON ET DE LA METROLOGIE

1. Description du processus de recrutement de l'échantillon

Dans ce chapitre sont décrits les processus de sélection des zones géographiques et de recrutement de l'échantillon.

1.1. Rappel du cahier des charges

Dans le cadre de la mission, 100 PAC doivent être instrumentées dont :

- 90 sites équipés en PAC AIR/EAU et 10 en PAC EAU/EAU,
- 70 sites équipés de PAC double service, 30 en PAC simple service,
- 10 sites équipés de PAC réversibles (utilisées en climatisation l'été),
- Un minimum de 10 PAC dites « connectées ».

En accord avec l'Ademe, l'ensemble de ces critères constitue une ligne directrice susceptible de quelques inflexions, notamment le ratio double service/simple service, en fonction de la statistique réelle rencontrée sur le terrain.

1.2. Source d'obtention des contacts

1.2.1. Fichier des opérations CEE (Ministère)

Le Ministère a communiqué à l'équipe projet un fichier contenant les informations de 1000 foyers ayant obtenu des CEE pour l'installation d'une pompe à chaleur (dossier finalisé depuis moins d'un an). Ce fichier comporte :

- Les coordonnées des propriétaires : nom, prénom, adresse postale, adresse électronique ;
- Le type de logement (maison / appartement) ;
- La zone climatique ;
- La surface du logement (par classe) ;
- L'efficacité énergétique saisonnière de la PAC installée ;
- Le type de foyer (ménage modeste ou non) ;
- Les coordonnées du professionnel ayant effectué les travaux.

1.2.2. Autres contacts

Le fichier ne contient pas d'information sur le type de PAC installé. On ne sait pas, par exemple, s'il s'agit d'une PAC air/eau ou eau/eau. Cependant la majorité des foyers de ce fichier se sont équipés d'une PAC air/eau, non utilisée pour climatiser en été. Seules 3 PAC eau/eau ont pu être identifiées dans le fichier. D'autres sources ont donc été mobilisées pour recruter des propriétaires de PAC eau/eau (rappel : 10 sites à instrumenter).

La Région Centre Val de Loire organise régulièrement le concours « Ma Maison Eco » qui récompense des projets de rénovation énergétique performante. La géothermie est le seul système énergétique éligible (le reste concernant isolation/ventilation). L'équipe qui gère ce concours a pu fournir les coordonnées de foyers ayant installé une PAC eau/eau dans le cadre de leur rénovation.

Certains fabricants ont également permis une mise en relation directe avec des installateurs qui ont pu proposer des sites qu'ils avaient équipés en PAC eau/eau. Ce procédé a permis le recrutement de participants dans la Haute-Garonne et le Vaucluse.

1.3. Principe général du recrutement

Le processus de sélection retenu (en dehors des PAC eau/eau) se rapproche d'un tirage aléatoire. En effet, l'essentiel des 100 participants a été retenu dans la liste de 1000 candidats fournie par le Ministère. Ainsi, la sélection est opérée sur un échantillon suffisamment large de contacts ayant les caractéristiques requises pour réaliser la campagne de

mesures (à savoir avoir installé une pompe à chaleur dans le cadre d’une rénovation). Le Tableau 1 ci-dessous décrit le principe général de recrutement.

N°	Etape
1	Choix des 20 zones géographiques sur la base des critères de présélection Les périmètres de recrutement ont été choisis sur la base des critères établis au moment de la réponse à l’appel d’offre (cf. §). Ils ont été validés lors du premier comité de pilotage.
2	Développement des outils de recrutement (cf. documents en annexes). Ces documents ont été mis au point en tirant parti des expériences de recrutement des précédentes campagnes de mesure.
3	Processus de recrutement Les 100 candidats sont recrutés au fur et à mesure de l’avancée du projet. L’adéquation du profil du candidat au projet est confirmée et la date approximative de pose des appareils de mesures par Enertech (entre septembre 2023 et début février 2024) leur est précisée.
4	Prise de rendez-vous (1 ^e visite pour instrumentation ; 2 ^e visite pour relevés enveloppe) Chaque participant est recontacté pour fixer la date et l’heure de rendez-vous. Cette opération a lieu 1 à 2 semaines avant l’intervention sur site.

Tableau 1 : Principe de recrutement de l’échantillon

1.4. Sélection des 20 zones de recrutement

1.4.1. Critères de sélection

Le critère géographique est le principal élément retenu pour ce recrutement. Ainsi les logements sont sélectionnés dans une vingtaine de départements (5 logements par zone), qui couvrent l’ensemble du territoire métropolitain. Cela permet de garantir une dispersion spatiale et de prendre en compte des différences climatiques qui peuvent avoir un impact sur les performances des Pompes à Chaleur (PAC). Les sous-critères suivants sont considérés pour le choix précis des départements à retenir :

- Température réglementaire extérieure de base (cf. Figure 1)

Des variations d’altitude sont par ailleurs recherchées pour inclure l’analyse des zones montagneuses.



Figure 1 : Températures de base réglementaires

- Pluviométrie et l'humidité (cf. Figure 2)



Figure 2 : Carte météorologique de la France avec la pluviométrie moyenne annuelle

- « Zone climatique », au sens de la réglementation thermique (cf. Figure 3).



Figure 3 : Carte française des zones climatiques définies dans le cadre de la RT2012

- Type d'espace géographique / Distribution des revenus

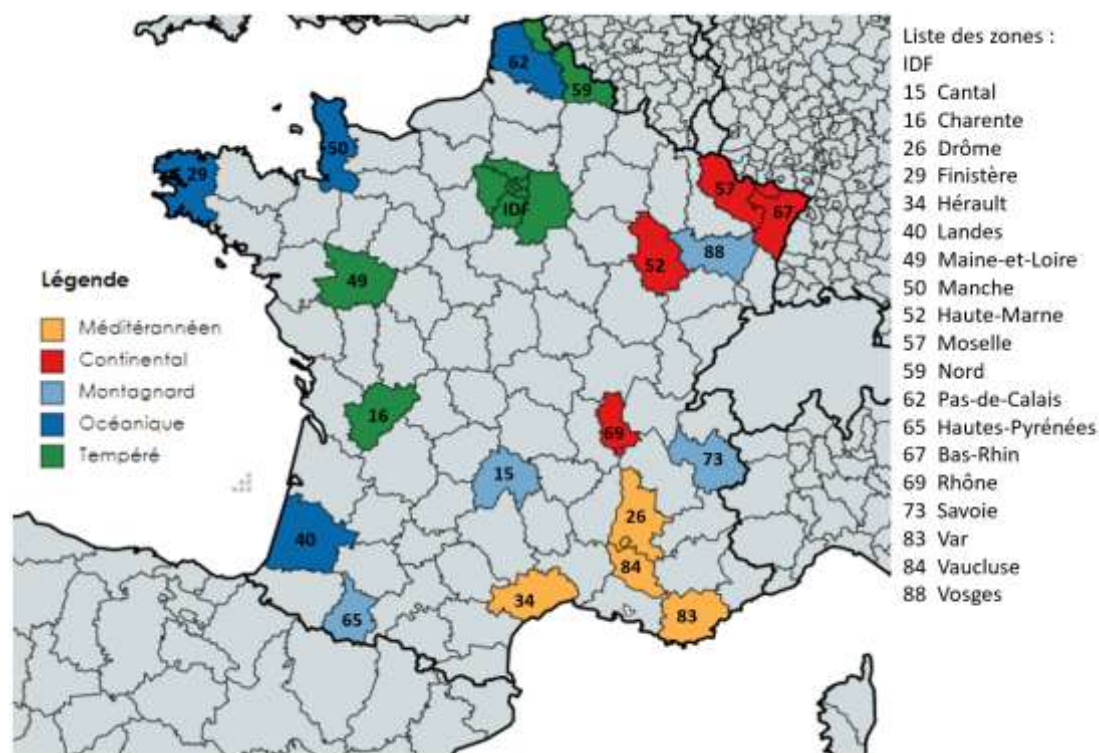
L'échantillon doit couvrir à la fois des zones urbaines, périurbaines et rurales. Il doit également tenir compte de la distribution inégale des revenus sur le territoire hexagonal.

- Caractéristiques propres au foyer/logement

On s'assure au moment du recrutement que le candidat n'a pas l'intention de déménager au cours des deux années à venir. Dans la mesure du possible, on choisit des logements qui utilisent exclusivement leur PAC pour se chauffer (pas d'appoint de chauffage autre que celui éventuellement intégré à la PAC). On sait cependant que cette condition est difficile à respecter et que l'utilisation d'un moyen de chauffage secondaire (poêle/cheminée à bois, sèche-serviette électrique...) sera fréquemment rencontrée.

1.4.2. Zones sélectionnées

Les 20 zones de recrutement sélectionnées selon les critères précédemment évoqués sont détaillées en Figure 4.



Zone climatique	Type de climat (couleurs de la carte)	N° département	Département	Région	Température de base de 0 à 200 m	Pluviométrie en mm en 2020
H1a	Océanique	62	Pas-de-Calais	HAUTS-DE-FRANCE	-9	772
H1a	Tempéré	59	Nord	HAUTS-DE-FRANCE	-9	681
H1a	Tempéré	94/77/91/95	Ile de France	ILE-DE-FRANCE	-7	644
H1b	Continental	57	Moselle	GRAND-EST	-15	659
H1b	Continental	67	Bas-Rhin	GRAND-EST	-15	506
H1b	Continental/Montagnard	52	Haute-Marne	GRAND-EST	-12	926
H1b	Montagnard	88	Vosges	GRAND-EST	-15	845
H1c	Montagnard	15	Cantal	AUVERGNE-RHÔNE-ALPES	-8	964
H1c	Continental	69	Rhône	AUVERGNE-RHÔNE-ALPES	-10	660
H1c	Montagnard	73	Savoie	AUVERGNE-RHÔNE-ALPES	-10	952
H2a	Océanique	50	Manche	NORMANDIE	-4	1002
H2a	Océanique	29	Finistère	BRETAGNE	-4	1270
H2b	Tempéré	49	Maine-et-Loire	PAYS DE LA LOIRE	-7	753
H2b	Tempéré	16	Charente	NOUVELLE-AQUITAINE	-5	782
H2c	Montagnard	65	Hautes-Pyrénées	OCCITANIE	-5	1149
H2c	Océanique	40	Landes	NOUVELLE-AQUITAINE	-5	1123
H2d	Méditerranéen	26	Drôme	AUVERGNE-RHÔNE-ALPES	-6	717
H2d	Méditerranéen	84	Vaucluse	PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR	-6	484
H3	Méditerranéen	34	Hérault	OCCITANIE	-5	557
H3	Méditerranéen	83	Var	PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR	-2	499

Figure 4 : Zones géographiques sélectionnées dans la cadre du projet.

Il n'a pas été possible de respecter totalement ces zones pour le recrutement des PAC eau/eau. Le Tableau 2 indique les départements dans lesquels elles se situent ainsi que la zone climatique associée.

Département	Zone climatique	Type de climat	Nombre de PAC eau/eau instrumentés
Bas-Rhin (67)	H1b	Continental	2
Indre et Loire (37) <i>associé à zone Maine-et-Loire (49)</i>	H1b	Tempéré	1
Savoie (73)	H1c	Montagnard	2
Loiret (45) <i>associé à zone Maine-et-Loire (49)</i>	H2b	Tempéré	1
Haute-Garonne (31) <i>associé à zone Hautes-Pyrénées (65)</i>	H2c	Tempéré	2
Vaucluse (84)	H2d	Méditerranéen	2

Tableau 2 : Répartition géographique des 10 PAC eau/eau recrutées

1.5. Processus de recrutement

Le processus de recrutement, en 5 temps, est détaillé dans le Tableau 3.

Etape n°	Moyens utilisés	Objectifs
1	Fichier opérations CEE pour les 20 zones sélectionnées	- Avoir les coordonnées de 50 participants par zone sélectionnée afin de pouvoir trouver 5 participants.
2	1 000 courriers postaux	- Invitation à participer à l'étude. - Lien vers un questionnaire en ligne de manifestation d'intérêt.
3	1 000 courriers électroniques	- Le mail permet de doubler le courrier postal (rappel). - Lien pointant vers le questionnaire en ligne de manifestation d'intérêt.
4	Recrutement téléphonique	- Recruter 5 foyers pour chacune des 20 zones géographiques. - Valider le profil du participant et de son installation. - Expliquer le projet et répondre aux éventuelles questions. - Recueillir son accord.
5	Prise de rendez-vous	- Rappeler le participant pour fixer la date et l'heure du rendez-vous.

Tableau 3 : Processus de recrutement utilisé pour constituer l'échantillon

Les documents utilisés aux différentes étapes (courrier, mail, questionnaire en ligne) sont fournis en annexe.

1.6. Planning de recrutement et d'instrumentation

Entre l'été 2023 et janvier 2024, tous les mois, 20 logements sont recrutés et 20 logements instrumentés en moyenne, selon le planning présenté en Tableau 4.

Pour mémoire l'échantillon visé était de 100 logements répartis dans 20 zones (départements), ce qui représente en moyenne 5 instrumentations par zone.

L'instrumentation s'est étalée sur environ 5 mois : le premier logement a été instrumenté le 11/09/2023 et le dernier le 01/02/2024.

			juin-août 23	sept-23	oct-23	nov-23	déc-23	janv-24
26	Drôme	5	recrut.	instrum.				
77,91,94,95	Île-de-France	5	recrut.	instrum.				
88	Vosges	5	recrut.	instrum.				
67	Bas-Rhin	3	recrut.	instrum.				
62	Pas-de-Calais	5		recrut.	instrum.			
69	Rhône	5		recrut.	instrum.			
73	Savoie	3		recrut.	instrum.			
49 (37,45)	Maine-et-Loire	3		recrut.		instrum.		
65 (31)	Hautes-Pyr.	4			recrut.	instrum.		
40	Landes	4			recrut.	instrum.		
15	Cantal	5			recrut.	instrum.		
29	Finistère	5			recrut.		instrum.	
83	Var	5				recrut.	instrum.	
57	Moselle	5				recrut.	instrum.	
50	Manche	5					recrut.	instrum.
84	Vaucluse	3						recrut. instrum.
59	Nord	5				recrut.		instrum.
34	Hérault	5					recrut.	instrum.
52	Haute-Marne	5					recrut.	instrum.
36	Charente	5					recrut.	instrum.

Tableau 4 : Planning de recrutement et d'instrumentation qui a été suivi

2. Stratégie d'instrumentation et métrologie déployée

Ce chapitre décrit la conception de la métrologie utilisée pour le projet ainsi que la stratégie de mise en œuvre sur le terrain.

2.1. Objectif général

L'objectif général de l'instrumentation peut se décliner en trois grands axes :

1. Quantifier objectivement les performances des PACs sur le terrain, à travers la **mesure de leur consommation électrique, de leur production de chaleur et d'un certain nombre de paramètres** (température extérieure, température de production, température des réseaux, température ambiante dans le logement).
2. Analyser les éventuels dysfonctionnements et proposer des pistes d'amélioration.
3. Evaluer les conditions de mise en œuvre des équipements (choix techniques de dimensionnement et d'implantation, mise en œuvre des réseaux, etc.) et proposer des pistes d'amélioration.

Le **périmètre de mesure de la consommation électrique des PAC** s'apparente à une mesure de type SPF4⁶, c'est-à-dire qu'il inclut l'unité intérieure, l'unité extérieure ainsi que l'ensemble des auxiliaires jusqu'aux circulateurs de distribution de chauffage secondaires le cas échéant (Figure 5). Les auxiliaires ne disposeront pas de voie de mesure dédiée exceptées les résistances d'appoints dont il est demandé d'évaluer spécifiquement le fonctionnement. Ce suivi des résistances d'appoint nécessite parfois l'installation d'une pince ampèremétrique dans l'unité intérieure directement au niveau du bornier car il n'existe pas toujours de départ électrique dédié dans le tableau. L'évaluation des consommations des pompes de circulation sera possible en analysant les monotones des puissances électriques appelées.

Le **périmètre de mesure de la chaleur produite par les PAC** inclut la production de chauffage et d'ECS. Cette mesure sera toujours effectuée le plus en amont possible de l'installation, c'est-à-dire au niveau des circuits primaires de chauffage et des circuits de charge des ballons ECS (Figure 5). Un certain nombre de compteurs de chaleur seront donc installés à l'intérieur-même des unités intérieures des PAC.

⁶ En référence à l'étude Fraunhofer ISE de 2020.

Périmètre de suivi électrique (avec suivi séparé des appoints électriques)

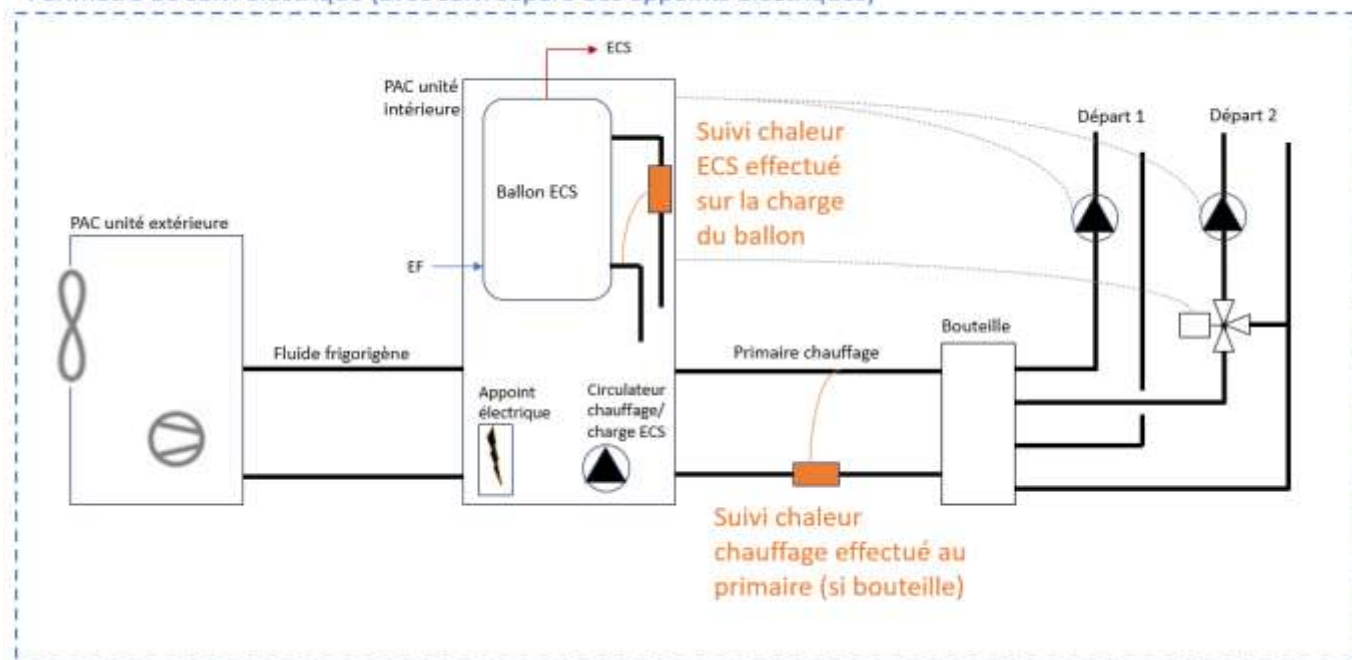


Figure 5 : Principe de suivi électrique des PAC et de pose des compteurs de chaleur.

2.2. Système de mesure

La présente campagne de mesure est ambitieuse sur le plan technique et logistique pour les raisons suivantes :

- Architecture de mesure lourde et communicante déployée chez des particuliers situés dans toute la France ;
- Mesure de la chaleur intégrée au plan de comptage (et non uniquement mesures électriques et de température), ce qui réhausse objectivement le niveau de technicité du matériel et des interventions ;
- Données générées au pas de temps de la minute ce qui crée un volume considérable de données et un temps limité d'intervention en cas de panne de mesure.

Le succès d'une telle campagne repose sur un certain nombre de points clés :

Matériel de mesure :

- Matériel de mesure précis, fiable, robuste et déjà éprouvé sur le terrain.
- Matériel de mesure compact devant s'adapter au contexte du logement individuel (tableaux électriques exigus, installations hydrauliques parfois compactées et difficiles d'accès du fait du contexte « rénovation »), sondes de températures nécessairement discrètes car dans le volume habitable, etc.
- Matériel de mesure communicant pour allier les contraintes de volumes de stockage, de maintenance des données à distance et de limitation des déplacements pour les analyses intermédiaires.

Hors comptage de chaleur, le matériel utilisé est issu principalement de la société Adekwatt (qui a repris l'activité d'Omegawatt), ainsi que de capteurs qui ont été conçus et fabriqués à Enertech (pulemètre et température TM).

Le matériel de comptage de chaleur non intrusif provient de la société japonaise Keyence, qui dispose d'une filiale commerciale française. Le capteur à ultrason Keyence FDH qui a été choisi est un compteur de chaleur de qualité industrielle dont l'erreur de mesure est inférieure à 3%.



Compteur de chaleur à ultrason non intrusif Keyence FDH utilisé dans cette mission.



Banc d'essai hydraulique d'Enertech pour la vérification et l'étalonnage des compteurs de chaleur.

Le set de mesureurs initialement prévu par logement est présenté dans le Tableau 5 et illustré en Figure 6. Extrapolé à l'ensemble des logements de l'échantillon il représente - au stade de la conception - environ 2035 voies de mesure⁷ (soit en moyenne 20 voies de mesure par logement).

⁷ Une mesure chaleur est constituée de 6 voies de mesure (débit, T1, T2, impulsion, T'1, T'2). Suivi électrique PAC : compté 2 voies en base et une voie additionnelle pour suivi local de l'appoint dans 25% des cas soit 225 voies au total.

Usage	Capteur	Pas de temps	Com muni cant	Stockage interne	Nb par logt	Remarques
Climat extérieur	 Sonde thermo/hygro sous abri anti-radiation Communique ses données en LoRa au routeur. Précision < 0,2°C.	1 min	Oui	Oui > 1 an à 1min	x 0,75	Mesure communicante à la minute avec un stockage interne de secours. Remarques : - 1 TD électrique instrumenté (celui de la PAC, parfois différent du TD principal). - Si nécessaire ajout d'une pince en local sur le bornier PAC pour suivre le ou les appoint(s) électriques(s). Imaginé a priori dans 25% des cas. - 180 compteurs de chaleur : 70 PACS double-service (140 compteurs) + 30 pacs simple service (30 compteurs) + 10 compteurs pour les cas – déjà rencontrés – où 2 départs de chauffage sortent de la PAC. - Un logger communicant recueille les pulses émis par chaque compteur de chaleur. Ce logger mesure et communique également ses propres températures en applique. - Le routeur dispose d'une carte Sim et d'un abonnement dédié pour le transfert des données. Il stocke également l'ensemble des données sur une carte SD avec une très grande mémoire. - Sonde extérieure : nous avons imaginé cette mesure non pertinente dans 25% des cas (config. / proximité d'un autre logt) d'où le 0,75.
Température et hygrométrie intérieure (séjour)	 Sonde thermo/hygro Communique ses données en LoRa au routeur. Précision < 0,2°C.	1 min	Oui	Oui > 1 an à 1min	x 1	
Consommation électrique de la pompe à chaleur (+auxiliaires) avec suivi séparé des résistances d'appoint	 Système Multivoie 2 (MV2) en tableau électrique Communique ses données en Wifi au routeur. Précision < 2%. Si nécessaire pour le suivi des résistances d'appoints : 1 ou 2 wattmètres pinces (WP) disposés directement au niveau du bornier de la pompe à chaleur. Précision < 2%.	1 min	Oui	Oui (SD) > 2 ans à 1min	x 1	
		1 min	Oui	Non	x0,25 (Wp)	
Consommation de chaleur (chauffage, Clim, ECS) et températures des circuits	 Compteur de chaleur non intrusif Keyence FDH (modèles 10,20 et 32) + Capteur Lora MVTM qui recueille les impulsions du compteur de chaleur et dispose en plus de ses propres mesures de température. Précision < 3%.	1 min	Oui	CC : 1 an à 10 min MVTM > 1 an à 1min	x 1,8	
Communication des données	 Routeur LoRa/Wifi => 4G (Passerelle communicante avec stockage interne)	1 jour	Oui	Oui (SD) > 2 an à 1min	x 1	
Consommation électrique du logement	 Pulseur Linky (enregistrement des impulsions du compteur électrique)	10 min	Non	14 mois	x 1	Consolidation possible du général logement grâce à la récupération auprès d'Enedis des données Linky (Enertech est habilité auprès du service SGE Tiers).
Température ambiante et températures technique	 Sonde température TM (précision < 0,2°C) : - Ambiance : dans une 2 ^e pièce (chambre) - Technique : dans le cas des installations avec bouteille (75%), T°C A/R secondaire	10 min	Non	14 mois	x 2,5	1 TM pour mettre en évidence les éventuelles différences de chauffe dans les chambres (permet d'enrichir les analyses). 2 TM techniques en plus dans 75% des logements.

Tableau 5 : Set de mesureurs prévu au stade de la conception du projet pour le suivi des grandeurs exigées dans le cahier des charges

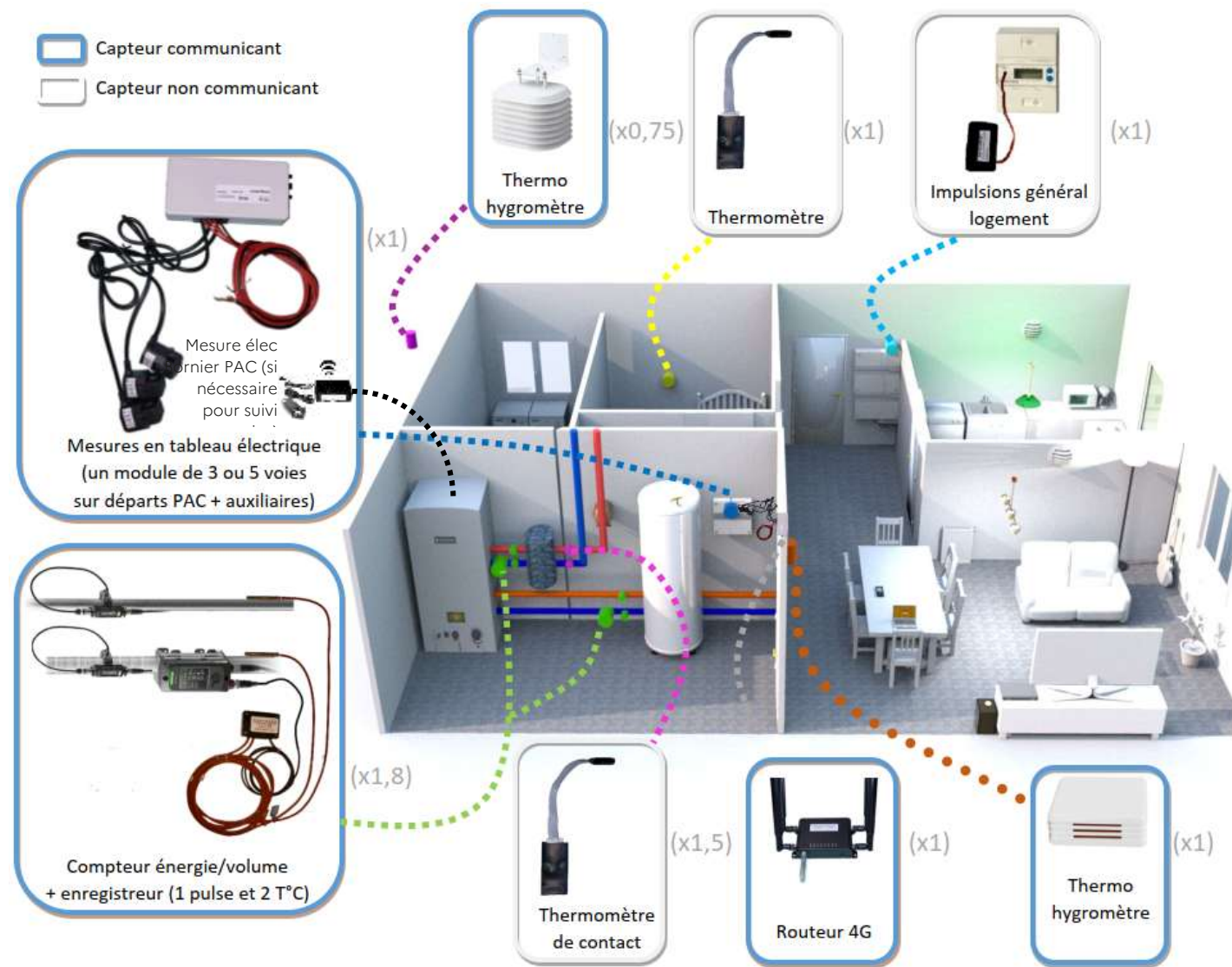


Figure 6 : Illustration de l'intégration dans un logement du set de mesureurs proposé

Chaîne de mesure et gestion des données :

- Enertech assure l'ensemble de la chaîne : pose des capteurs, suivi/maintenance des données et analyse, ce qui permet de renforcer la cohérence de l'ensemble et de faciliter le suivi des systèmes ainsi que le lien avec chaque occupant.
- Les potentiels messages d'erreurs émis par les systèmes communicants sont contrôlés quotidiennement. Lorsqu'un message est reçu une procédure de correction à distance est lancée. Une intervention est envisagée lorsque la procédure n'aboutit pas.
- Une vérification visuelle des données brutes est par ailleurs réalisée périodiquement pour s'assurer de la bonne cohérence des mesures.

Stockage, sécurisation et communication des données

L'architecture du plan d'instrumentation proposé permet de sécuriser les données grâce à un triple enregistrement :

- o Enregistrement en local dans les capteurs.
- o Enregistrement en local dans le routeur 4G.
- o Enfin enregistrement des données communiquées à distance sur un serveur dédié.

Ce niveau de redondance permet de minimiser le risque de pertes de données.

La communication quotidienne des données sur le serveur permet un suivi fin de la campagne et une réaction rapide en cas de problème.

2.3.Description de l'instrumentation

2.3.1. Actions réalisées dans tous les logements

Les actions suivantes sont réalisées dans tous les logements sans exception :

Instrumentation

Une intervention d'instrumentation dure en moyenne entre 3 et 4 heures (2 heures au minimum, 5 heures au maximum).

Voici la liste des actions effectuées systématiquement :

- Rappel auprès de l'occupant de l'intérêt et des enjeux de la mission.
- Renseignement avec l'occupant d'un questionnaire (présenté en annexe §4.5) qui permet de relever des éléments de contexte (occupation du logement, énergie utilisée avant l'installation de la PAC, date et modalités d'installation de la PAC, coût de l'installation, aides perçues, etc.).
- Signature de deux documents par l'occupant : 1/ le formulaire Enedis permettant d'accéder aux données du compteur Linky et 2/ Formulaire RGPD.
- Photos du logement et de l'installation (PAC et panoplie).
- Photos et relevé des émetteurs de chaleur du logement et du thermostat de la PAC.
- Ensemble de relevés techniques : réalisation d'un schéma de principe de l'installation, relevé des références précises de la PAC et des auxiliaires, relevé de l'ensemble des paramètres accessibles sur la régulation.
- Relevés des informations Linky et pose d'un pulsemètre sur la diode lumineuse.
- Pose des sondes de températures ambiantes (séjour et chambre).
- Pose d'une station météo à proximité de l'unité extérieure de la PAC.
- Pose des capteurs de courant dans le tableau électrique de la PAC et si nécessaire au bornier de la PAC pour le suivi des appoints électriques
- Pose des compteurs de chaleur.
- Pose des températures techniques additionnelles.

NB : La pose d'une station météo (thermo-hygromètre avec abri antiradiation) à l'extérieur est réalisée dans 80% des logements et non dans la totalité, du fait de la proximité géographique de certains logements.

Relevés relatifs au bâti

Les caractéristiques du bâti et du système de ventilation installé seront relevées lors d'une 2^e visite spécifique effectuée dans chaque logement.

L'objectif sera notamment de réaliser un calcul de déperditions de la maison, qui servira de point de référence pour évaluer le dimensionnement de la pompe à chaleur, et ainsi tenter de corrélérer la contribution à la performance du sur- ou sous-dimensionnement de la pompe à chaleur.

La visite comportera, pour la partie « relevés » :

- Métrés du volume chauffé.
- Niveaux d'isolation des murs, plancher bas, toiture, fenêtres. Ces données seront recueillies sans mesure destructive, principalement sur la base des déclarations des ménages.
- Système de ventilation.

2.3.2.Principe de pose des capteurs de courant

Le suivi électrique des PACS est effectué :

- Dans le tableau électrique où se trouvent les disjoncteurs de la PAC : il s'agit en général d'un petit tableau situé à proximité de l'installation. Il arrive parfois que les départs électriques se trouvent directement dans le tableau principal du logement.
- Si nécessaire en plus au niveau du bornier de l'unité intérieure de la PAC, dans le cas où l'appoint électrique ne dispose pas d'un départ dédié dans le tableau précédent.

Le système de mesure électrique est en général invisible après fermeture du tableau électrique.

La Figure 7 illustre quelques cas de pose des capteurs.



Figure 7 : Exemples de poses des capteurs de consommation électrique

NB : le suivi électrique du général logement est effectué via le relevé du PRM compteur (pour obtention des données auprès d'Enedis) ainsi que par la pose d'un pulsemètre non communicant directement sur la diode lumineuse du compteur par soucis de redondance.

2.3.3. Principe de pose des compteurs de chaleur

Le comptage de chaleur se compose de 2 éléments :

1. Un compteur à ultrason (Keyence FDH) composé d'un capteur de débit à ultrason relié à deux sondes de températures en applique. Chaque élément est vissé autour du tuyau.

2. Un logger connecté en filaire au compteur permettant de totaliser et communiquer les impulsions émises par le compteur. Ce logger dispose par ailleurs de ses propres sondes de température posées en applique et disposées à côté de celles du compteur par soucis de redondance et d'observabilité à distance.

Voici les quelques règles de pose qui ont été suivies pour les compteurs de chaleur :

- La pose des compteurs à l'extérieur des PAC a été privilégiée à chaque fois qu'elle était possible.
- L'emplacement du compteur est choisi de manière à disposer de la plus longue section droite possible pour éviter toute perturbation. Dans l'immense majorité des cas un champ libre de 5DN (5 fois le diamètre du tuyau) sans singularité était disponible en amont et en aval du compteur, ce qui permet une mesure parfaitement fiable.
- Les sondes de température en applique ont toujours été posées sur des parties métalliques (jamais sur du multicouche ou du PER), avec scotch aluminium, double rilsan et calorifuge.
- Paramétrage du compteur : 1 pulse tous les 20Wh pour la sortie impulsionnelle. Seuil de détection fixé à 0,2 L/min pour le débit et 0,2°C de « delta T » aller/retour pour la chaleur.
- Pour le chauffage : mesure effectuée en général en sortie de la PAC (primaire bouteille ou départ direct).
- Pour l'ECS : mesure en sortie PAC si ballon ECS déporté, à l'intérieur de la PAC si ballon ECS intégré.
- En cas d'impossibilité de mesure de la charge ECS ou du départ chauffage pour des raisons d'accessibilité ou de place, disposition d'un compteur de chaleur sur le « général chaleur chauffage + ECS » en sortie d'échangeur condenseur côté eau, avec ajout d'un compteur complémentaire départ chauffage ou charge ECS. Obtention du comptage manquant par soustraction.
- Alimentation des compteurs sur secteur grâce à la pose d'une multiprise intégrant aussi l'alimentation du routeur 4G. Consommation du système (quelques watts) hors champ de mesure car sur un réseau de prise du logement. Une prise est toujours laissée libre pour l'occupant.
- Réalisation d'un schéma de principe à main levée indiquant la configuration de l'installation, la disposition de compteurs de chaleur, l'emplacement des appoints électriques (généralement intégrés au comptage de chaleur mais pas toujours) et des principaux organes de l'installation.
- En fin d'intervention et après vérification de toute la chaîne de mesure : agencement propre des boîtiers et des fils de manière à pérenniser la pose et ne pas gêner d'éventuelles interventions de maintenance.

Au total 166 compteurs de chaleur ont été posés : 61x2 (61 PAC double service) + 39 (39 PAC simple service) + 5 (logements où 2 compteurs ont été nécessaires pour suivre le chauffage).

La Figure 8 illustre quelques cas de pose.



Figure 8 : Exemples de poses de compteurs de chaleur

2.3.1. Principe de pose des sondes d'ambiance

La sonde d'ambiance principale – communicante - est placée de préférence à proximité du thermostat de la PAC. Elle se trouve en général dans la pièce principale (séjour), parfois dans un dégagement central du RDC.

La sonde d'ambiance additionnelle - non communicante - est placée dans une pièce de vie secondaire (en général chambre de l'étage) représentative de l'ambiance de cette 2^e zone. Elle est souvent dissimulée derrière un meuble.

Quelques cas de pose des sondes d'ambiances sont illustrés en Figure 9.



Figure 9 : Exemples de poses de sondes d'ambiances

2.3.2. Principe de pose des stations météo

Les stations météo (mesure thermo-hygro avec abri antiradiation) sont placées de préférence à proximité immédiate de l'unité extérieure, de manière à refléter au mieux l'ambiance sur laquelle travaille la PAC. La zone de rejet d'air de l'unité est bien entendu évitée. Cet emplacement est en général aussi celui de la sonde de température extérieure de la PAC.

Quelques cas de pose sont illustrés en Figure 10.



Figure 10 : Exemple de pose de stations météo

2.3.3. Principe de suivi des captages géothermiques

Dans le cas des PAC eau/eau, deux sondes de température communicantes sont posées en applique, en amont et aval de l'échangeur évaporateur côté eau.

2.3.4. Quantité de capteurs déployés sur le terrain

Les types et quantités de capteurs réellement installés dans les logements de l'échantillon sont présentés dans le Tableau 6 ci-dessous. Un total de **1013 capteurs** et **2094 voies de mesures** ont été déployés, ce qui représente **en moyenne 10 capteurs et 21 voies de mesure par logement**.

Périmètre	Dénomination capteur	Grandeur mesurée	Mesure communicante	Pas de temps	Nombre de capteurs	Nombre de voies de mesures	total :
Production PAC	Keyence FDH	Volume, énergie, temp. aller, temp. retour	non	1 min	166	498	1152
	MVTM technique 1	Impulsion Energie, temp. aller, temp. Retour	oui	1 min	166	498	
	MVTM technique 2	(Captage pac eau/eau) temps. aller, temp. retour	oui	1 min	10	20	
	Thermomètre datalogger	Température technique en applique	non	10 min	136	136	
Général électrique logt	PM linky	Impulsion lumineuse linky	non	10 min	99	99	99
Consommation PAC	Système multivoies 2	Consommation électrique	oui	1 min	108	334	376
	Wattmètre pince	Consommation électrique		1 min	41	41	
	Wattmètre série	Consommation électrique		1 min	1	1	
Ambiance	Thermomètre datalogger	Température	non	10 min	105	105	305
	MVHM intérieur	Température, hygrométrie	oui	1 min	100	200	
Météo	MVHM extérieure	Température, hygrométrie	oui	1 min	81	162	162
					1013	2094	

Tableau 6 : Liste et quantitatif des capteurs déployés dans les 100 logements

3. Caractérisation de l'échantillon de 100 logements

Dans ce chapitre sont décrits les caractéristiques des foyers participants à l'expérimentation ainsi que les pompes à chaleur installées dans les logements.

3.1. Les foyers participants

3.1.1. Répartition géographique

La stratégie envisagée initialement (cf. paragraphe 1.4.2) a été respectée. La carte de la Figure 11 permet de localiser les 100 logements instrumentés (en rose les 90 PAC air/eau et en bleu les 10 PAC eau/eau).



Figure 11 : Localisation géographique des 100 PAC instrumentées dans le cadre du projet (en rose les PAC air/eau ; en bleu les PAC eau/eau)

Le Tableau 7 présente la répartition des maisons par zone climatique et par tranche d'altitude. La liste exhaustive des paramètres par site (altitude, température de base et zone climatique) est fournie en annexe 4.1.

Les températures de base, qui servent de donnée d'entrée au dimensionnement de la puissance de chauffage, s'échelonnent entre -2°C (Var, zone côtière) et -16°C (département des Vosges (88) altitude $> 400\text{m}$). La moyenne des températures de base des sites s'établit à -8°C .

Concernant les zones climatiques, qui influencent principalement le besoin de chauffage et le COP de production, on observe une distribution assez homogène du Panel (environ 10% à 20% du Panel dans chaque zone climatique), ce qui est conforme à l'objectif initial.

Zone climatique	Altitude <= 400m	Altitude de 400 à 800m	Altitude > 800m	Total
H1a	15 PAC -10°C < Tbase < -7°C			15 PAC
H1b	19 PAC -15°C < Tbase < -7°C	2 PAC Tbase = -16°C		21 PAC
H1c	8 PAC -11°C < Tbase < -10°C	6 PAC -11°C < Tbase < -13°C	1 PAC (alt. 1080m) Tbase = -16°C	15 PAC
H2a	10 PAC -4°C < Tbase < -2°C			10 PAC
H2b	9 PAC -7°C < Tbase < -5°C			9 PAC
H2c	8 PAC -6°C < Tbase < -4°C	2 PAC -8°C < Tbase < -7°C		10 PAC
H2d	10 PAC -7°C < Tbase < -6°C			10 PAC
H3	9 PAC -5°C < Tbase < -2°C	1 PAC Tbase = -7°C		10 PAC
Total	88 PAC	11 PAC	1 PAC	100 PAC

Tableau 7 : Répartition des sites instrumentés par zone climatique et altitude. Indication des températures de base

3.1.2. Numérotation des logements

Le système de numérotation des logements retenu propose une identification à 6 chiffres :

- Les 3 premiers chiffres correspondent au numéro du logement (de 001 à 100) ;
- Les 3 derniers au département.



Figure 12 : Exemple d'identification d'un logement

3.1.3. Composition des foyers

Les **foyers** de l'échantillon sont composés en moyenne de **2,44 personnes** ce qui est légèrement supérieur à la moyenne de la population française de 2,17 (INSEE, 2020⁸).

Comme l'illustre la Figure 13, ils sont constitués pour moitié de retraités (37% de couples et 13% de personnes âgées seules). 27% des foyers sont modestes, soit 3% de moins que la statistique nationale (30% de la population française⁹). Cette dernière information est issue du fichier des opérations CEE fourni par le Ministère.

⁸ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381486>

⁹ <https://www.lafinancepourtous.com/decryptages/finance-perso/revenus/niveau-et-composition-des-revenus-moyens-en-france/>

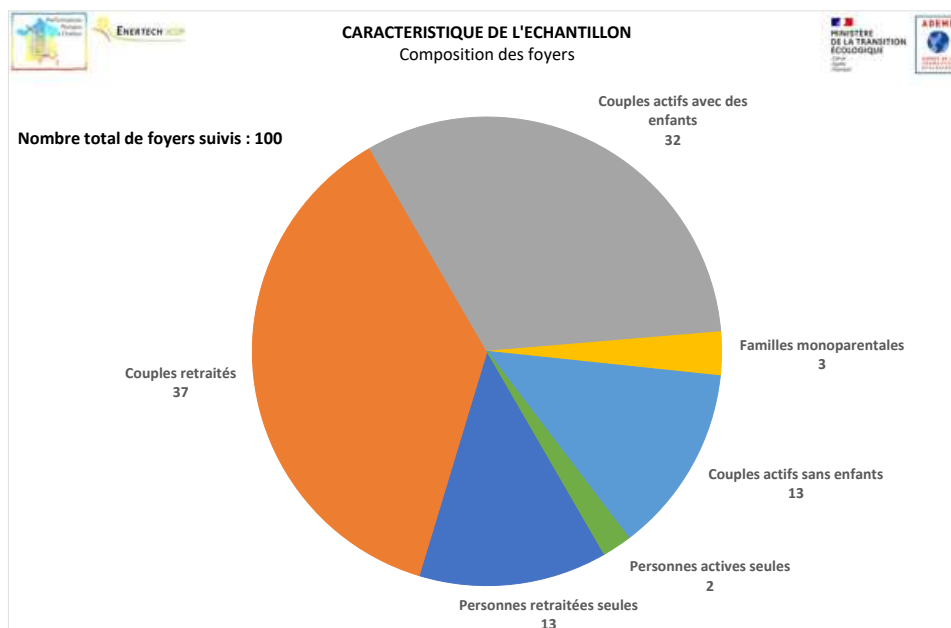


Figure 13 : Composition des foyers de l'échantillon

3.1.4. Abonnement électrique

La **puissance la plus fréquemment souscrite** est **9kVA** (45% des foyers), 8% des logements possèdent un abonnement 6kVA et 15% un 15kVA ou plus. Plus de la moitié sont en option base et 16% sont équipés d'une installation photovoltaïque.

Puissance d'abonnement (kVA)	Nombre de logements	Option			Photovoltaïque (autoconsommation, injection)	Puissance souscrite augmentée au moment de l'installation de la PAC
		Base	Heures pleines/Heures creuses	Autres (EJP, tempo...)		
6	8	4	4	0	2	1
9	45	30	14	1	6	26
12	32	17	13	2	5	21
15	4	1	2	1	1	2
18	10	2	7	1	2	2
24	1		1	0		1
TOTAL	100	54	41	5	16	53

Tableau 8 : Caractéristiques de l'abonnement électrique des logements

Plus de la moitié des foyers (53) ont **augmenté leur puissance électrique souscrite**, soit au moment de l'installation de leur pompe à chaleur soit peu de temps après suite à des problèmes de disjonction. Étonnamment, 2 participants déclarent l'avoir réduite.
Pour 33 (des 53) logements, l'augmentation de puissance est connue : elle est de +3kVa dans 64% des cas et de +6kVA dans 36% des cas. Le changement de puissance souscrite le plus fréquent un passage de 6 à 9kVA (45% des logements).

Puissance souscrite					
Après Avant	6	9	12	15	18
3	1	1			
6		15	9		
9			5	1	
12					1

Tableau 9 : Evolution de la puissance souscrite avant/après l'installation de la PAC

3.2. Les logements

3.2.1. Méthodologie

▪ Déperditions thermiques selon la norme NF EN 12831

Le dimensionnement est quasiment toujours réalisé par l'entreprise qui a installé la PAC, parfois à l'aide d'un logiciel fourni par le fabricant¹⁰. Les déperditions thermiques ne sont donc quasiment jamais calculées de manière exhaustive compte tenu de la complexité des relevés et saisies associés. Dans un cas seulement (PAC eau/eau), le propriétaire a fait appel à un bureau d'études.

Pour caractériser thermiquement les 100 logements de cette étude, un « audit enveloppe » a été effectué dans chaque logement. Enertech a sous-traité ces audits dans 70 logements et les a réalisés lui-même dans les 30 autres. Pour chaque logement, l'audit consistait en une visite pour collecter les informations sur le bâtiment (métrés précis, composition des parois, présence, type et épaisseur d'isolant, qualité des menuiseries, de l'étanchéité, présence d'une VMC...) et une étude au bureau à partir des relevés effectués.

L'objectif était double :

- Déterminer la surface habitable « chauffée » ;
- Déterminer la puissance déperditive du logement selon la NF EN 12831.

La norme NF EN 12831 est spécifiquement conçue pour aider à dimensionner les générateurs de chauffage d'un bâtiment (ici la PAC) et les émetteurs de chauffage des différentes pièces (non exigé dans cette étude).

Il s'agit d'un calcul statique (températures intérieures, extérieures, flux de chaleur constants) additionnant les déperditions de chaleur par transmission au travers des différentes parois (planchers bas, planchers hauts, murs, baies, ponts thermiques) et celles liées au renouvellement d'air (infiltrations par les défauts d'étanchéité et ventilation mécanique le cas échéant).

La norme définit une température extérieure de base qui correspond à la température la plus basse relevée dans le département considéré pendant au moins 5 jours de l'année, et qui est corrigée suivant l'altitude et la proximité de la mer (cf. Tableau 7). Elle ne tient pas compte des apports internes (chaleur dégagée par les habitants, l'électroménager, ...) ou externes (chaleur apportée par le soleil à travers les menuiseries).

En outre, la norme prévoit le calcul d'une surpuissance de montée en température de l'espace chauffé, pour tenir compte de l'intermittence du chauffage (en particulier, pour remonter la température du bâtiment après une absence prolongée). Cette surpuissance, proportionnelle à la surface de l'habitation,

¹⁰ Les logiciels déterminent en général un ratio de puissance déperditive par m² de surface au sol, en fonction de l'année de construction et des rénovations thermiques réalisées depuis. Ils ne demandent pas un relevé précis des métrés.

dépend de l'inertie du bâtiment et de la durée prévue pour remonter en température (maximum 8h en résidentiel).

Dans le cas de cette étude, nous avons reçu des résultats provenant de deux logiciels : Perrenoud et Pléiades. Le premier logiciel propose par défaut le calcul d'une surpuissance, ce qui n'est pas le cas du second. **La puissance déperditivité que nous avons retenue pour les comparaisons avec les puissances PAC installées est donc la puissance déperditivité « de base » sans considérer de surpuissance de relance supplémentaire.**

▪ Surfaces habitables

La visite a permis de relever la surface habitable « chauffée » des logements. Elle se distingue légèrement de la SHAB telle que définie par l'article R.111-2 du code de la construction et de l'habitation car elle intègre également :

- Les vérandas : dans le cas où elles sont intégrées effectivement à l'espace habité et qu'elles sont chauffées ;
- Les sous-sols habités et chauffés, d'une hauteur sous plafond supérieure à 1.8m.

Conformément à la définition, elle exclut :

- Marches et cages d'escaliers, gaines techniques, murs, cloisons, embrasures de portes et fenêtres ;
- Combles non aménagés, caves, sous-sols, remises, garages, terrasses, loggias, balcons, vérandas non chauffées, locaux communs et autres dépendances des logements, ni des parties de locaux d'une hauteur inférieure à 1,80 mètre.

Dans la suite de l'étude, lorsque nous parlerons de la SHAB, il s'agira donc d'une SHAB que nous pourrions qualifier de « chauffée ».

▪ Biais et erreurs rencontrées

Faire réaliser un calcul des déperditions calorifiques par un bureau d'études est la méthode la plus précise pour dimensionner une PAC, pour autant elle comporte aussi son lot d'erreurs. Lors de l'analyse des études qui nous ont été transmises, nous avons pu détecter et corriger quelques erreurs qui nous semblent intéressantes de documenter ici.

La plus impactante étant de considérer une paroi non isolée comme isolée (ou inversement), conduisant à des écarts d'un facteur 1 à 2 sur la déperdition totale (!) Dans le même ordre d'idée, la confusion (assez fréquente) entre le béton cellulaire (isolant) et le parpaing (très déperditif), conduisent à des sous-estimations pouvant atteindre 40% de la déperdition corrigée. Enfin d'autres erreurs plus difficilement détectables peuvent également fortement impacter le résultat.

Les principales erreurs détectées sont présentées ci-dessous (Tableau 10 et Figure 15).

Description de l'erreur identifiée	Impact sur le résultat (%)			Principaux logements concernés
	Sur-estimation	Sous-estimation	Erreur	
Paroi isolée considérée non isolée et inversement	x	x	57-230%	11 / 15 / 16
Température intérieure erronée (0°C au lieu de 19°C)		x	53%	6
Composition de paroi erronée (béton « cellulaire » considéré à la place de murs en parpaing, lames d'air isolantes sur de fortes épaisseurs, erreur épaisseur isolant)		x	8-40%	10 / 18 / 19 / 20 / 42 / 86
Coefficient de transmission par défaut trop pessimiste ($U = 2.5$)	x		15-31%	12 / 26 / 29 / 46 / 65
Mauvais zonage des espaces tampons (combles...)		x	25-30%	67 / 70
VMC non configurée		x	9-16%	42 / 49
Coefficient de transmission nul (murs $U = 0$; menuiseries $U_w = 0$)		x	8-12%	24 / 25
Absence de prise en compte des ponts thermiques (linéiques ou menuiseries)		x	5-13%	9 / 10 / 24 / 26 / 30
Température de base erronée ($dT = 1-2^{\circ}C$)	x	x	3-10%	41 / 44 / 48
Paroi déperditive non comptée		x	2-6%	9
Double comptage paroi	x		4%	
Température salle de bain (19/21/22°C)		x	Mineur <2%	Non critique

Tableau 10 : Liste des principales erreurs détectées dans les audits enveloppes sous-traités

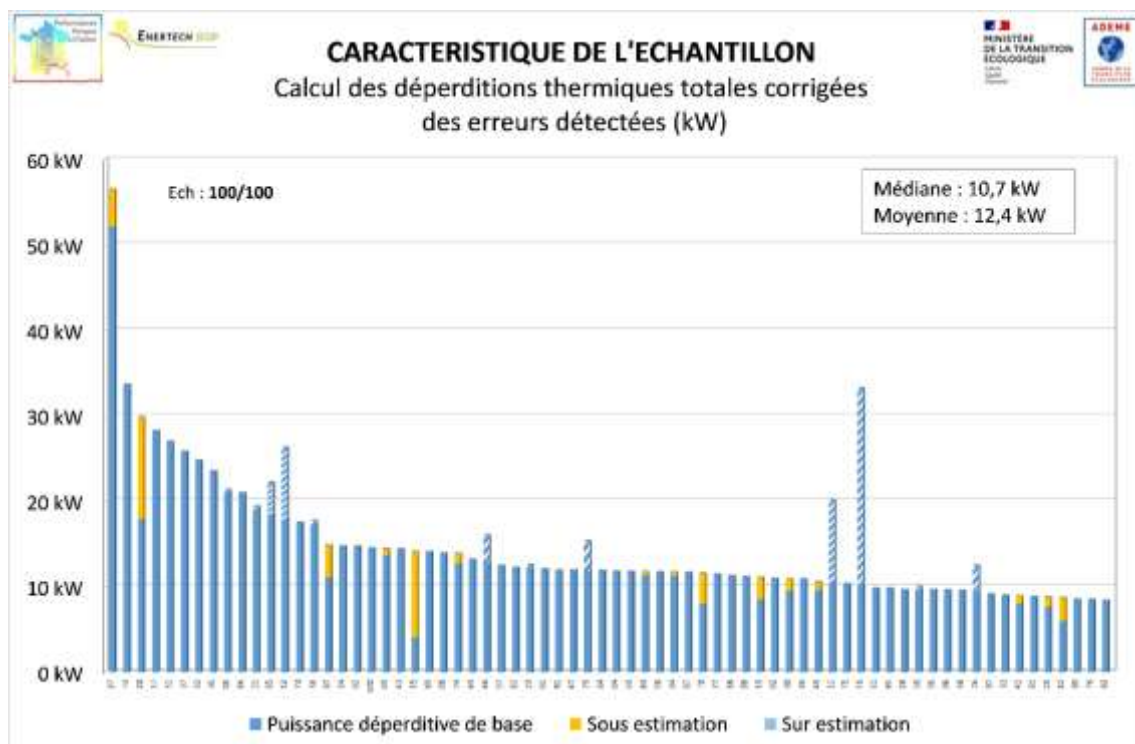


Figure 14 : Erreurs principales détectées dans les audits enveloppe sous-traités

Nous listons ci-dessous quelques sources d'erreurs ou approximations supplémentaires :

- *Etudes sur plan :*

Deux études thermiques ont dû être réalisées sans visite (absence ou refus de l'occupant), donc sur plan et à l'aide de photographies aériennes et d'un entretien téléphonique, ce qui signifie un risque d'erreur plus élevé.

- *Détermination de la composition des murs :*

La détermination est non destructive, et s'appuie sur l'échange avec l'occupant (qui a une connaissance plus ou moins précise de la composition des murs de son logement), l'observation de l'intérieur des parois au niveau des prises de courant, etc. et peut comporter des erreurs.

- *Sol sur terre-plein :*

Les modélisations logicielles ont tendance à améliorer sensiblement la résistance thermique des planchers bas des logements sur terre-plein, en considérant l'ajout d'une couche de 2m de sol avec une conductivité thermique par défaut de 2 W/m.K (soit une résistance supplémentaire de 1 m².K/W) : en pratique, les propriétés thermiques du sol sont très dépendantes du type de sol et de roche, et surtout de l'humidité du sol, paramètres inconnus de l'auditeur.

- *Performance thermique des menuiseries :*

La performance thermique des menuiseries (Uw) s'appuie sur un ensemble de relevés visuels et très rarement sur une valeur extraite de facture. La déperdition, produit du mètre par le Uw, demeure donc souvent approximative.

- *Pertes thermiques liées au renouvellement d'air :*

Le calcul des déperditions inclut la prise en compte des pertes thermiques par renouvellement d'air avec une *estimation* du taux d'infiltrations d'air d'une part, et une *estimation* du débit nominal de la VMC ou de l'extracteur dans le cas de présence d'une ventilation mécanique fonctionnelle (les VMC hors service n'ont pas été considérées dans le calcul).

Le débit nominal de la VMC n'étant jamais connu, il est estimé à partir du nombre de bouches d'extractions du logement et du nombre de pièce du logement en considérant que la ventilation répond à la réglementation.

Le taux d'infiltration est estimé à l'aide d'un faisceau d'indices :

- Matériaux de construction (béton > parpaing > pierre) ;
- Plancher de type hourdi, parquet (peu étanche) ou béton (étanche) ;
- Présence d'un enduit extérieur continu et en bon état ;
- Présence (et état) de joint(s) sur les menuiseries, évaluation de la qualité d'étanchéité des fenêtres lors de l'ouverture / fermeture (mise en pression ou non) ;
- Ouvertures prévues pour de la ventilation naturelle (taille, nombre).

3.2.2. Caractéristiques générales des logements

- Type de logement

L'échantillon ne contient quasi exclusivement que des maisons indépendantes ou mitoyennes et seulement un seul appartement en « maison collective » (Figure 15). Ceci est essentiellement dû à l'objet de l'étude, à savoir les PAC air/eau ou eau/eau en remplacement d'une chaudière que l'on trouve très peu en logement collectif pour des raisons évidentes d'intégration.

- Surface habitable

Environ la moitié des logements a une surface comprise entre 80 et 140 m². La surface moyenne vaut 152 m² (avec 62,3 m² par habitant) et la médiane 136 m² (Figure 16). Les logements de l'échantillon sont donc plutôt « grands » par rapport à la statistique nationale¹¹ qui évoque en 2020 une superficie moyenne de 114,3 m² pour les maisons individuelles.

¹¹ Les conditions de logement des ménages résidant en France en 2020

Ceci peut être lié à un biais d'échantillon mais aussi au fait que l'installation d'une PAC requiert *en moyenne* un certain budget (cf. §3.4.4), donc un niveau de revenu potentiellement plus élevé ce qui flèche vers des logements de plus grande taille.

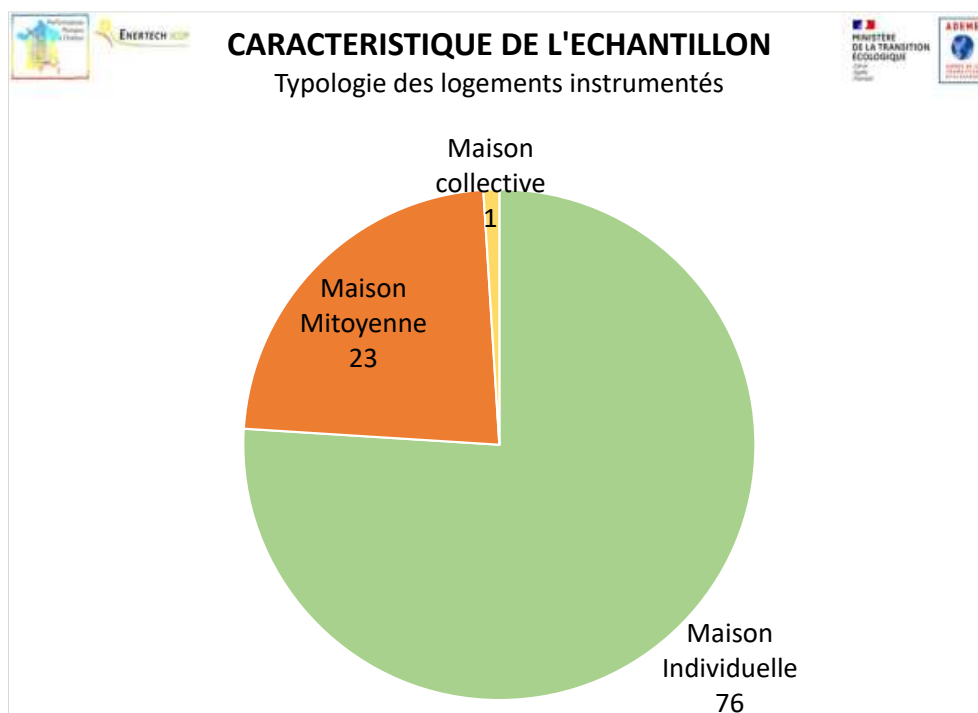


Figure 15 : Typologie des logements instrumentés

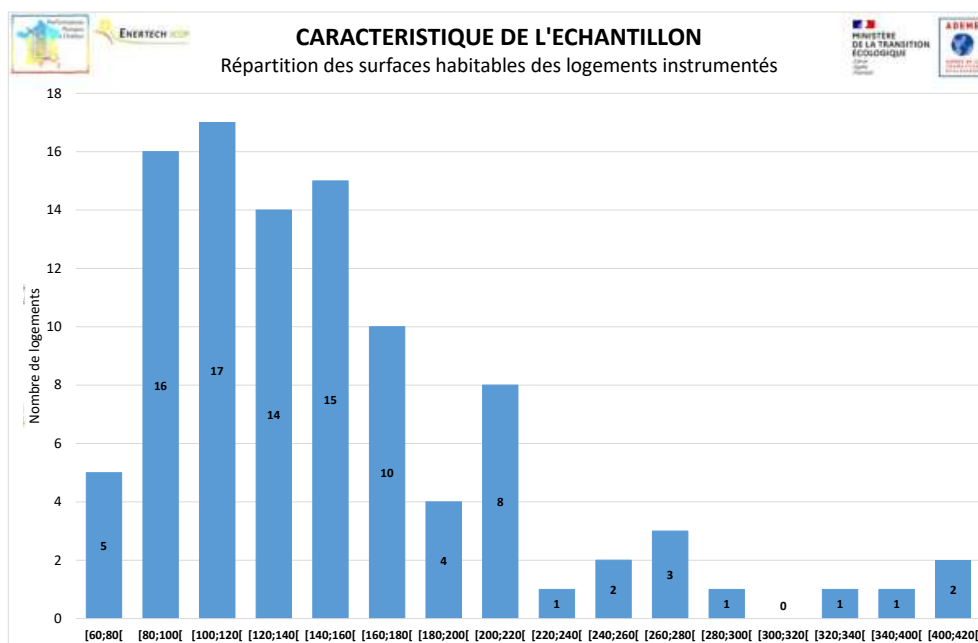


Figure 16 : Graphique de la répartition des surfaces habitables des logements de l'échantillon

- **Date de construction**

La date de construction a pu être obtenue pour près de 80% de l'échantillon. On observe environ un tiers de maisons construites avant 1948, un tiers entre 1948 et 1975 et un tiers de maisons après 1975 (Figure 17).

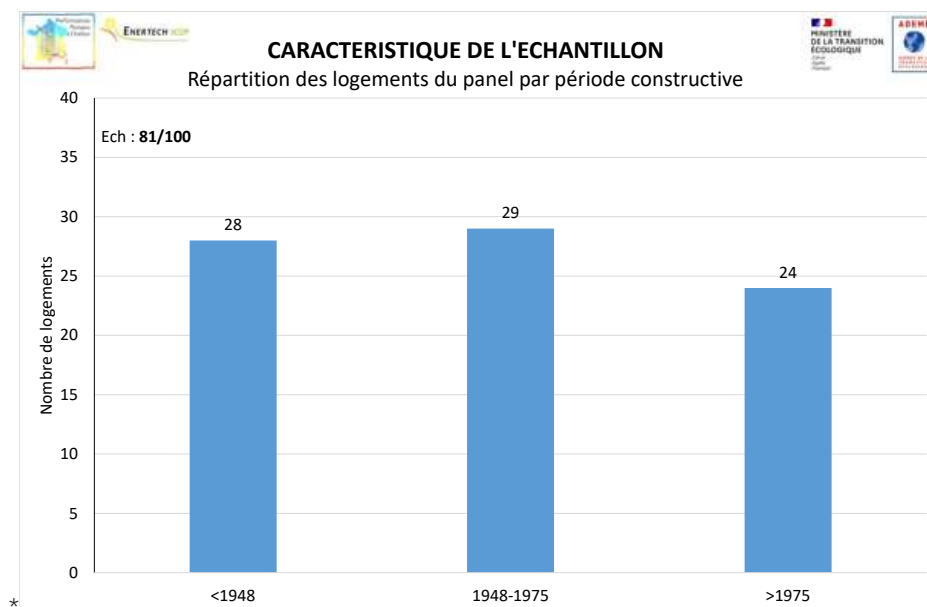


Figure 17 : Année de construction des logements de l'échantillon

- **Type de ventilation**

Les différents types de ventilation¹² relevés au cours des audits sont présentés en Figure 18. On constate que dans un tiers des cas la ventilation n'est pas mécanique, ce qui signifie pour une moitié la présence de grilles sans caisson et pour l'autre l'absence de tout dispositif. Dans les deux tiers des cas on observe une ventilation mécanique qui se trouve être très souvent une ventilation simple flux classique ou des extracteurs localisés. Seules deux ventilations double flux ont été relevées (sur deux maisons disposant d'une PAC eau/eau).

Dans le cas d'une ventilation mécanique classique, les débits réglementaires sont utilisés par les logiciels pour calculer la déperdition à température de base. Ils correspondent sensiblement à un renouvellement d'air permanent dans le logement de l'ordre de 0,5 volume par heure.

¹² NB : Les ventilations hygrovariables n'ont pas été distinguées des ventilations autorégables par les auditeurs.

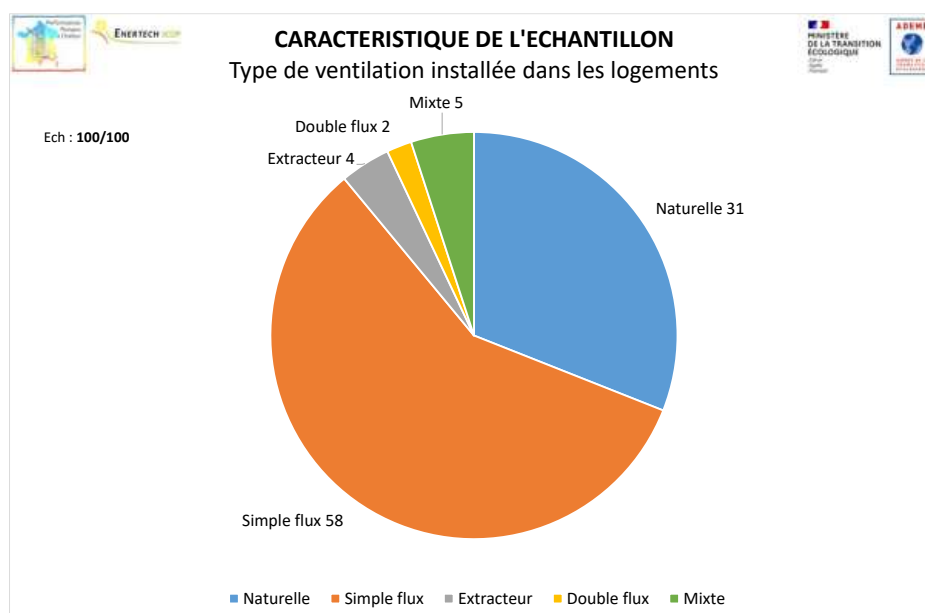


Figure 18 : Type de ventilation des logements de l'échantillon

- **Infiltrations et renouvellement d'air total**

Les infiltrations supposées dans le calcul des déperditions sont issues de valeurs par défaut intégrées dans les logiciels de calcul. La valeur utilisée dépend parfois de l'appréciation qualitative de l'enveloppe par l'auditeur (basse, moyenne, élevée, etc.).

Les n50 résultants des audits sont présentés en Figure 19 et correspondent à des valeurs très peu performante, cohérentes avec l'étude *Exist'air* du Cerema¹³. Pour se fixer les idées le niveau passif exige un n50 inférieur à 0,6. On vise en rénovation performante un n50 inférieur à 1 vol/h, voire 3 vol/h dans une configuration dégradée.

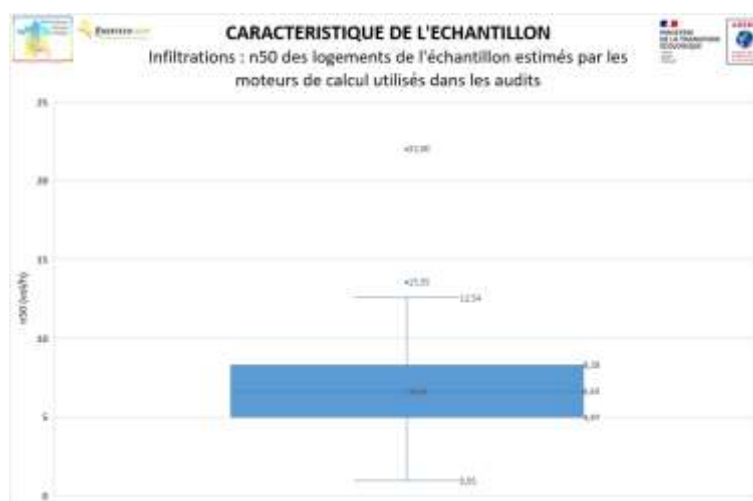


Figure 19 : Infiltrations : n50 des logements de l'échantillon estimés par les audits

¹³ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/campagne-mesures-permeabilite-air-logements-construits-2005#toc-le-projet->

Des valeurs de l'étude qui nous été fournies sur 76 maisons individuelles d'avant 2005 donnent un n50 moyen de 8,5 vol/h (min 1,8 vol/h, max 53,3 vol/h) et une valeur médiane de 6,6 vol/h.

Les débits d'air correspondant sont présentés en Figure 20 et comparés aux débits de ventilation lorsqu'ils existent (cas d'une ventilation mécanique). On voit que le sujet des infiltrations est loin d'être négligeable du point de vue des audits puisque les débits d'air associés égalent, en moyenne, ceux de la ventilation.

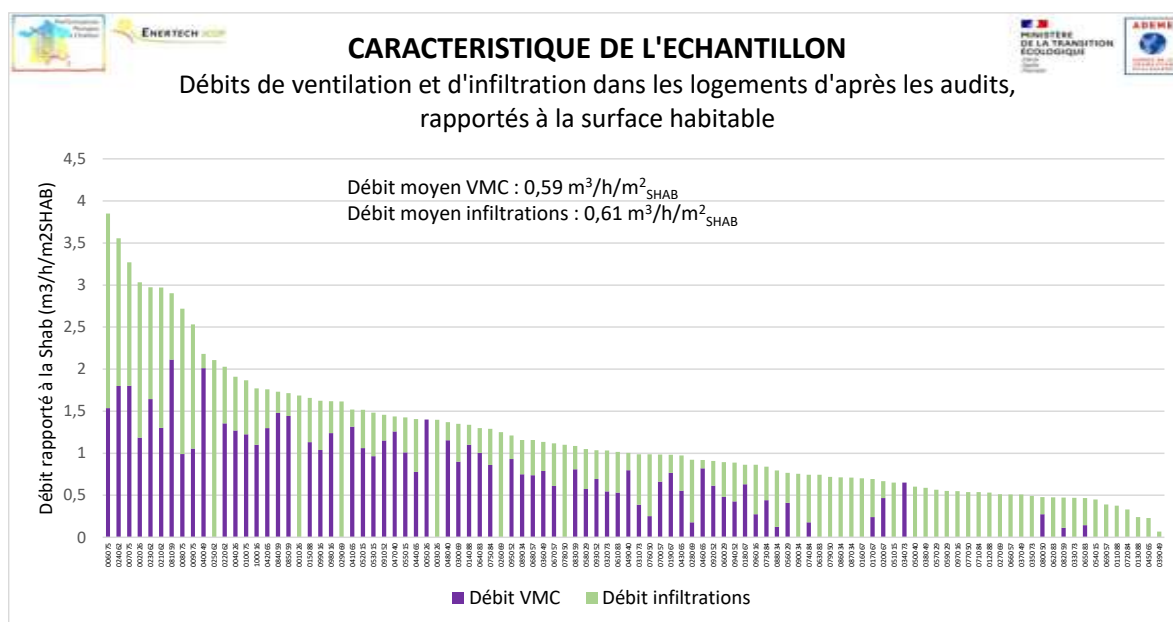


Figure 20 : Débits de ventilation et d'infiltration dans les logements, rapportés à leur surface habitable (selon les audits réalisés)

3.2.3. Déperdition et performance thermique du bâti

▪ Déperditions globales

Les déperditions globales calculées dans l'ensemble des logements sont présentées ici.

- Le graphique en Figure 21 présente la déperdition rapportée à la surface habitable du logement et pour un degré d'écart intérieur/extérieur, de manière à adimensionner la comparaison de la taille des logements et de leur zone climatique. C'est la qualité de l'isolation, la compacité et les échanges liés à la ventilation et aux infiltrations qui sont analysés ici. Des seuils sont proposés en fond de graphique de manière à faciliter la lecture : "très bien isolé", "bien isolé", "moyennement isolé" et "peu ou pas isolé". Pour fixer les idées ces seuils (empiriques) correspondent aux ordres de grandeur présentés dans le tableau ci-dessous :

			Exemple conduisant à cette déperdition :
Peu ou pas isolé	4,5 W/m²shab/°C Déperdition	<	Sol non isolé ; Isolant mur < 3 cm ; Isolant toiture < 6 cm ; Fenêtres : simple vitrage
Moyennement isolé	3 W/m²shab/°C Déperdition	<	Sol non isolé ; Isolant mur 3 à 6 cm ; Isolant toiture 6 à 12 cm ; Fenêtres : double vitrage ancien
Bien isolé	1,5 W/m²shab/°C Déperdition	<	Sol légèrement isolé ; Isolant mur 6 à 12 cm ; Isolant toiture 12 à 24 cm ; Fenêtres : double vitrage performant
Très bien isolé	Déperdition	<	Isolant sol > 10 cm ; Isolant mur > 12 cm ; Isolant toiture > 24 cm ; Fenêtres : double performant ou triple vitrage

- Le graphique en Figure 22 présente, dans le même ordre de logements, les déperditions absolues des logements, c'est à dire prenant en compte leur surface habitable et la zone climatique où ils se trouvent. L'ordre décroissant n'est plus respecté puisque certains logements "compensent" leur faible isolation par leur petite taille ou un climat plus clément, tandis que d'autres dégradent leur résultat du fait de leur surface habitable importante ou de la rigueur climatique où ils se trouvent.

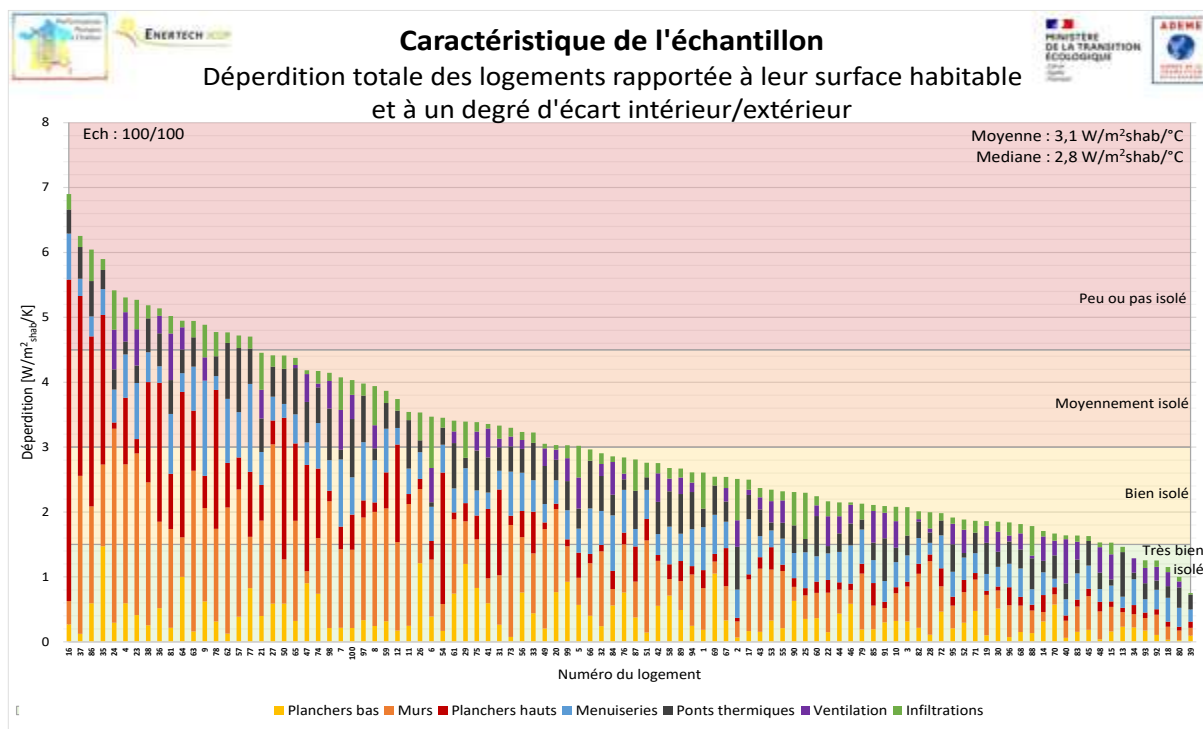


Figure 21 : Déperdition des logements de l'échantillon, rapportée à leur surface habitable et à 1°C d'écart de température intérieur/extérieur

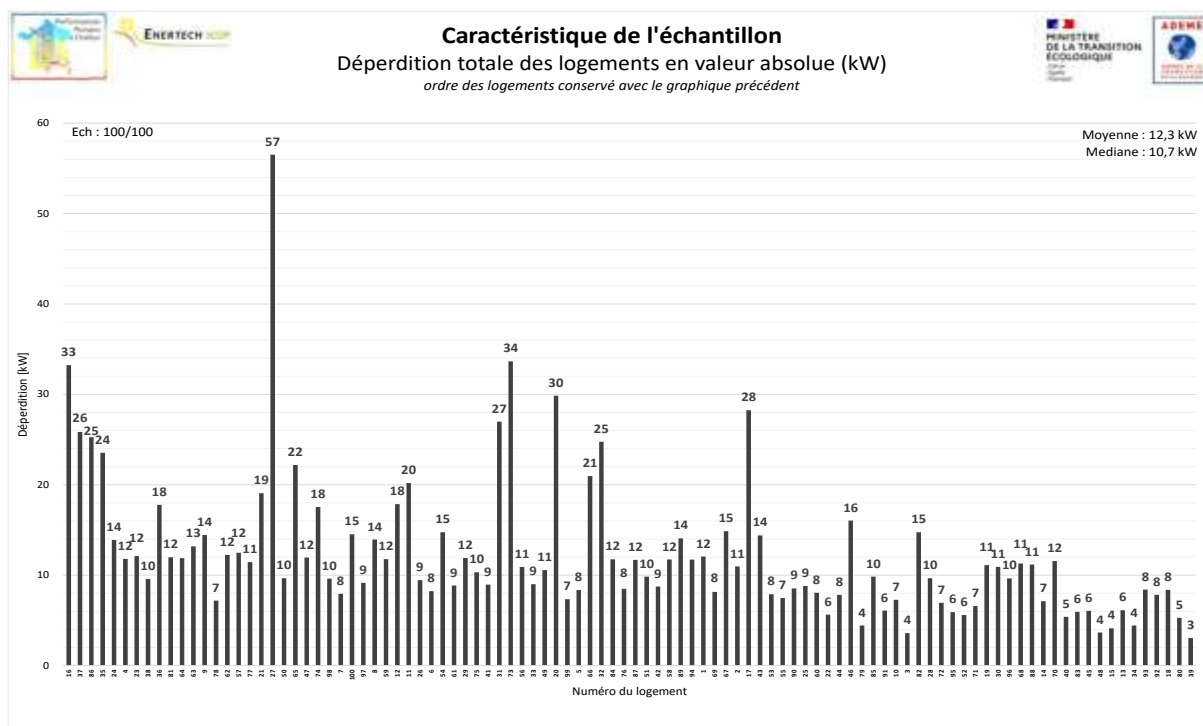


Figure 22 : Déperdition totale des logements (classement conservé avec le graphique précédent)

Les déperditions relatives¹⁴ (Figure 21) nous montrent toute la diversité de l'échantillon : la déperdition par m² de surface habitable et pour un écart de 1°C avec l'extérieur varie d'un facteur 1 à 9 entre le logement le moins déperditif et le logement le plus déperditif. Toutes les catégories intermédiaires sont représentées, signe de la bonne représentativité de notre échantillon. On dénombre ainsi :

- 16% de logements peu ou pas isolés ;
- 29% de logements moyennement isolés ;
- 47% de logements bien isolés ;
- 8% de logements très bien isolés.

Les déperditions absolues dans chaque catégorie sont assez dispersées du fait des surfaces habitables, compacités et climats variables d'un cas à l'autre, mais suivent tout-de-même une médiane décroissante :

- Logements peu ou pas isolés : médiane 12,4 kW (min 7 kW ; max 26 kW) ;
- Logements moyennement isolés : médiane 10,9 kW (min 7 kW ; max 57 kW) ;
- Logements bien isolés : médiane 9,7 kW (min 4 kW ; max 28 kW) ;
- Logements très bien isolés : médiane 7 kW (min 3 kW ; max 13 kW).

Le graphique en Figure 23 présente l'importance relative de chaque poste de déperdition en fonction du niveau d'isolation. On constate que les postes habituellement pas ou peu traités comme les infiltrations, les ponts thermiques ou encore les déperditions du sol prennent une part de plus en plus importante à mesure que la performance s'accroît. Le traitement exhaustif de tous les postes devient primordial pour attendre d'excellents niveaux d'isolations. *NB : Les ponts thermiques sont estimés au forfait, en fonction d'un niveau de saisie qui varie beaucoup d'un auditeur à l'autre. Comme pour les infiltrations, la valeur de déperdition associée doit être lue plutôt comme une estimation.*

¹⁴ NB : La déperdition « relative », c'est-à-dire rapportée à la surface habitable, intègre non seulement la performance de l'isolation mais aussi la compacité de la maison. En effet, toutes choses égales par ailleurs, une maison moins compacte (c'est-à-dire offrant plus de parois déperditives pour un m² habitable) aura une déperdition relative plus importante.

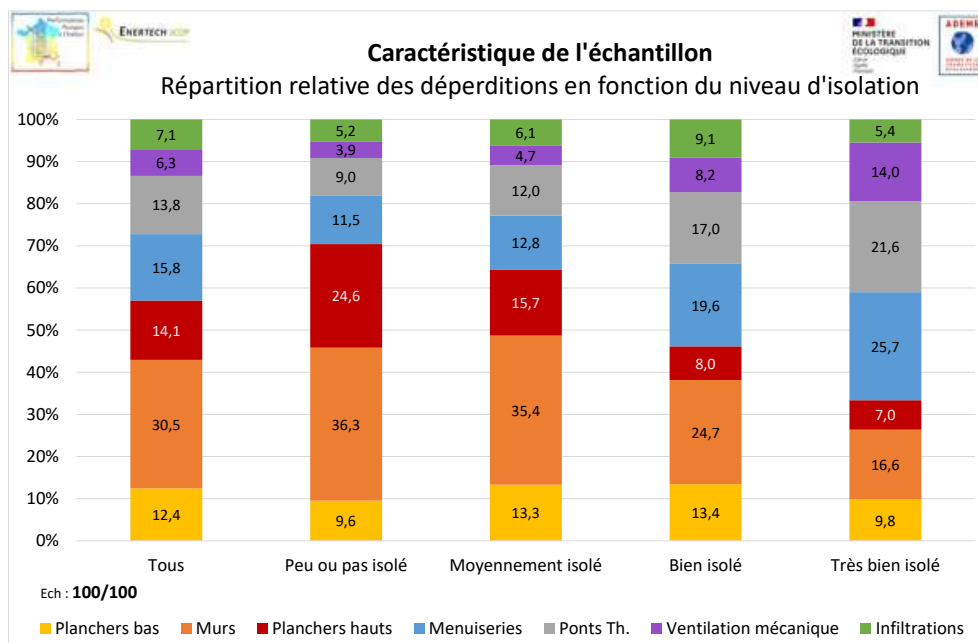


Figure 23 : Répartition relative des déperditions en fonction du niveau d'isolation

Le niveau de déperdition relative en fonction de la période de construction est présenté en Figure 24. Comme on peut s'en douter la corrélation, bien qu'existante, est très peu marquée du fait de l'ensemble des travaux de rénovation qui ont été effectués depuis la date de construction.

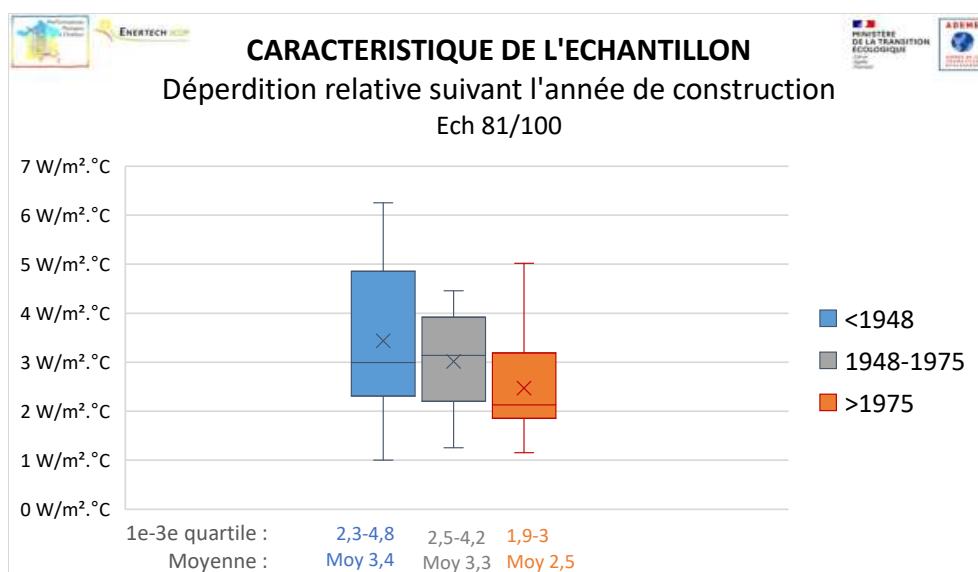


Figure 24 : Niveau de déperdition relative en fonction de la période de construction

▪ Performance thermique des parois

Les performances thermiques des parois rencontrées dans les logements de l'échantillon sont présentées en Figure 25. Pour fixer des repères, un U de 0,25 W/m².K correspond environ à 16 cm d'isolant, un U de 0,5 à 8 cm d'isolant, un U de 1 à 4 cm d'isolant, etc. Concernant les fenêtres, un Uw de 0,9 W/m².K ne peut être atteint qu'en triple vitrage. Un bon double vitrage se trouve sous les 1,8 W/m².K. Ces données nous

montrent le niveau *moyen* assez peu performant du parc de logements individuels français et la très grande dispersion rencontrée.

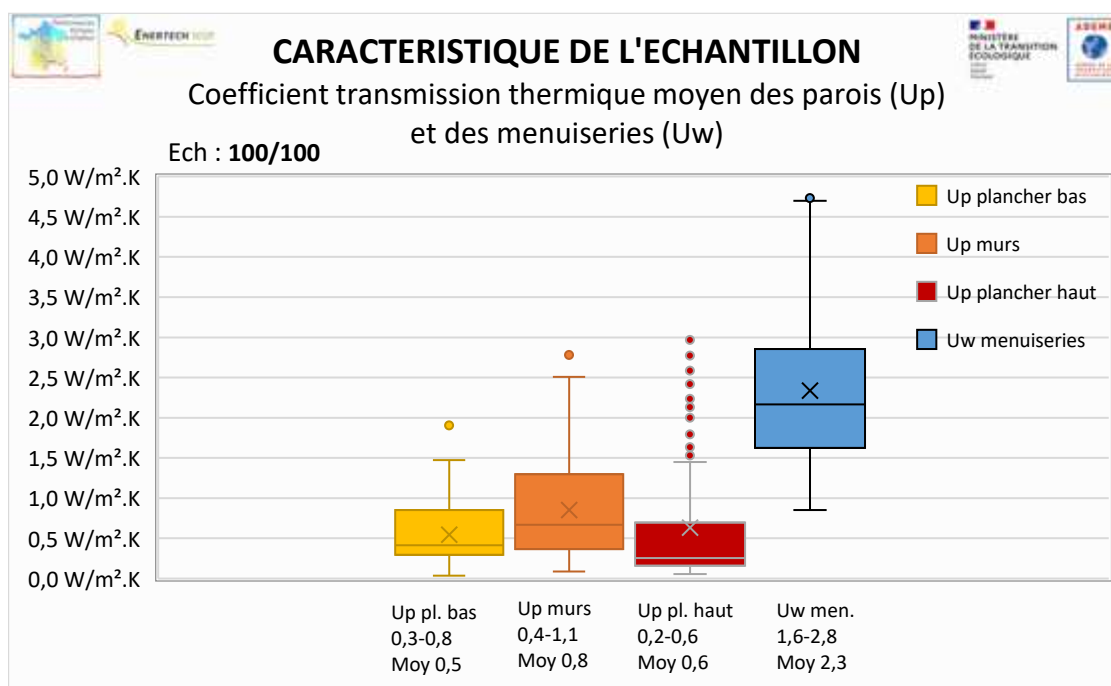
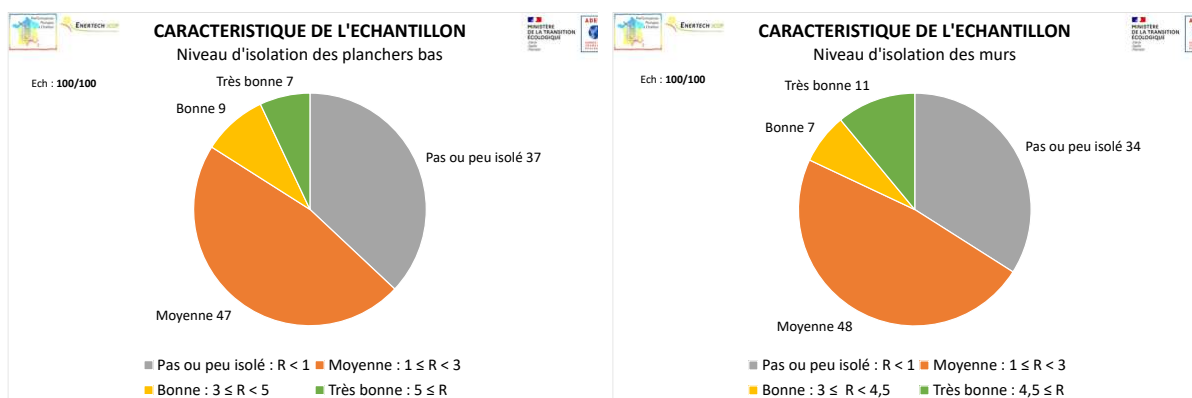


Figure 25 : Coefficients de transmission thermique des parois rencontrées dans l'échantillon

Si l'on place des seuils « empiriques » de performance par typologie de paroi, on peut se donner une idée plus claire des proportions (Figure 26). On constate ainsi que :

- les planchers bas sont assez mal isolés dans les trois quarts des cas, ce qui est partiellement rattrapé dans le calcul par l'ajout d'un R de 1 (valeur par défaut) dans le cas d'une configuration sur terre-plein, le sol ayant un effet tampon.
- Les murs, dans près de 80% des cas, sont soit moyennement isolés ($1 < R < 3 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ = moyenne de 8 cm d'isolant) soit peu ou pas isolés ($R < 1 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ = moyenne de 2 cm d'isolant).
- Les planchers hauts ont une isolation satisfaisante dans plus de la moitié des cas. L'isolation reste moyenne ($1 < R < 3 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$) à très faible ($R < 1 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$) dans 42% des cas.
- Enfin les menuiseries demeurent moyennes dans plus de la moitié des cas et basse dans 19% de cas (5 logements possèdent du simple vitrage et 14 logements du vieux double vitrage).



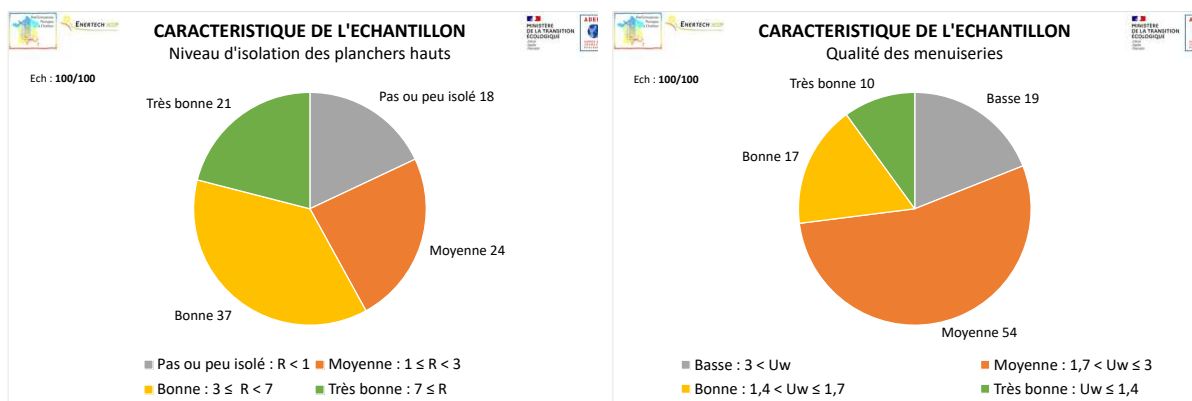


Figure 26 : Proportions des niveaux d'isolation des différentes parois des logements de l'échantillon

3.3. Les pompes à chaleur

Comme demandé par le cahier des charges, l'échantillon est composé de 90 PAC air/eau et 10 PAC eau/eau. Le nombre de PAC double service a été revu à la baisse suite à des difficultés de recrutement, en lien avec la statistique réelle sur le terrain : il est finalement de 61 PAC double service alors que l'objectif initial était de 70.

3.3.1. PAC Air/eau

L'échantillon de 90 PAC Air/eau est réparti entre :

- 55 PAC double service (assurant à la fois la production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire),
- 35 PAC simple service (chauffage uniquement).

On dénombre 22 modèles monoblocs (boucle frigorifique contenue dans l'unité extérieure, liaison hydraulique entre l'unité extérieure et le logement) et 68 modèles bi-blocs (cas classique avec liaison frigorifique entre l'unité extérieure et le logement).

26 PAC (29% de l'échantillon air/eau) sont des modèles « haute température » (HT), c'est-à-dire qu'elles peuvent produire de la chaleur à une température supérieure ou égale à 65°C. 21 PAC (23% de l'échantillon air/eau) sont même des modèles « très haute température » (THT), pouvant produire de la chaleur à une température supérieure ou égale à 70°C.

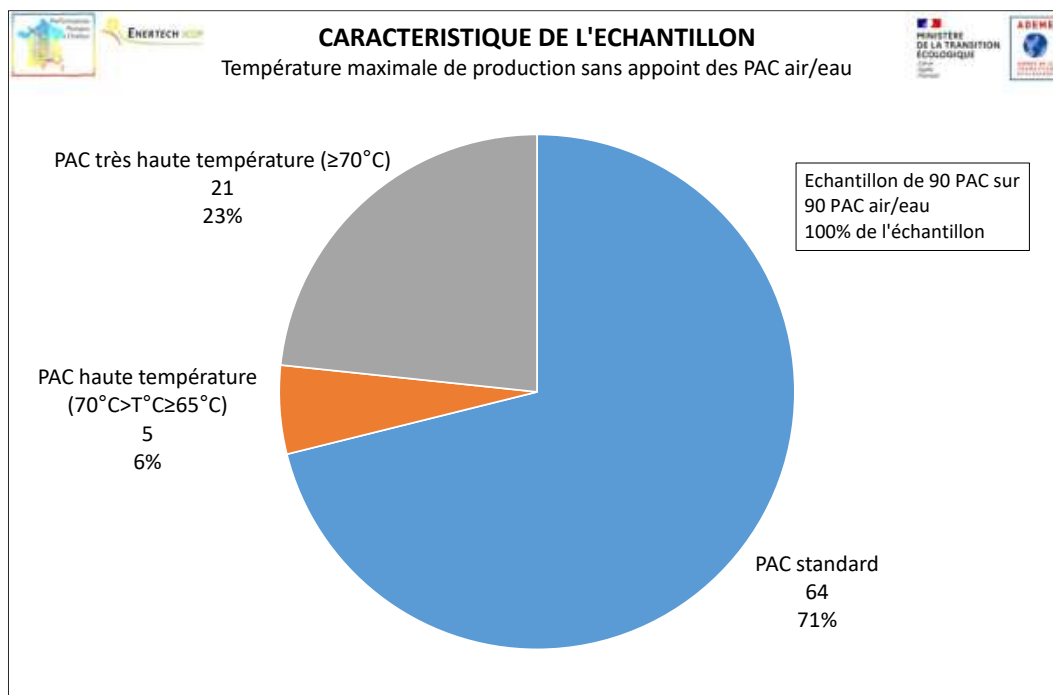


Figure 27 : Répartition de la température maximale de production sans appoint des PAC air/eau

3.3.2. PAC Eau/eau

L'échantillon de 10 PAC eau/eau est réparti entre :

- 6 PAC double service
- 4 PAC simple service.

On rencontre 4 types de technologies différentes dans les sites instrumentés :

- Géothermie sur sondes verticales (4 PAC – sondes entre 105 et 150 mètres)
- Géothermie sur nappe (3 PAC – captage entre 3 et 30 mètres – pompes immergée ou de surface)
- Géothermie sur capteur horizontal (2 PAC)
- Géothermie sur corbeilles (1 PAC – 6 corbeilles)

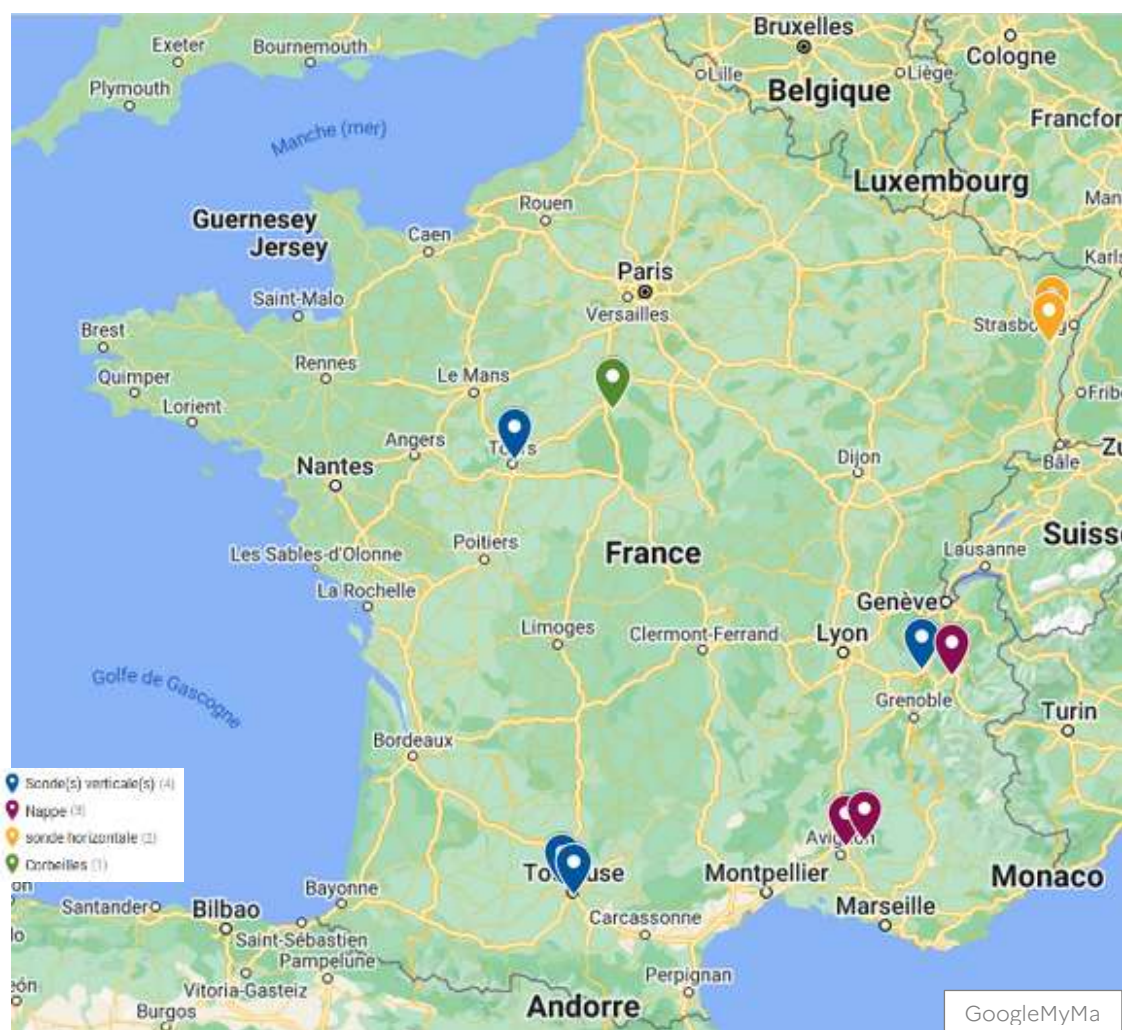


Figure 28 : Localisation géographique des 10 PAC eau/eau instrumentées et indication des types de géothermie

En considérant l'échantillon des 10 PAC eau-eau, 8 sont des modèles « haute température » (80% de l'échantillon), c'est-à-dire qu'elles peuvent produire du chauffage à une température supérieure ou égale à 65°C. 2 PAC (20% de l'échantillon) sont des modèles « standard », produisant du chauffage à une température inférieure à 65°C au maximum. Ainsi, bien qu'aucune PAC eau-eau très haute température ne soit recensée dans notre échantillon, les modèles eau-eau rencontrés sont davantage en capacité de produire du chauffage à haute température, en comparaison à la proportion observée pour les air-eau.

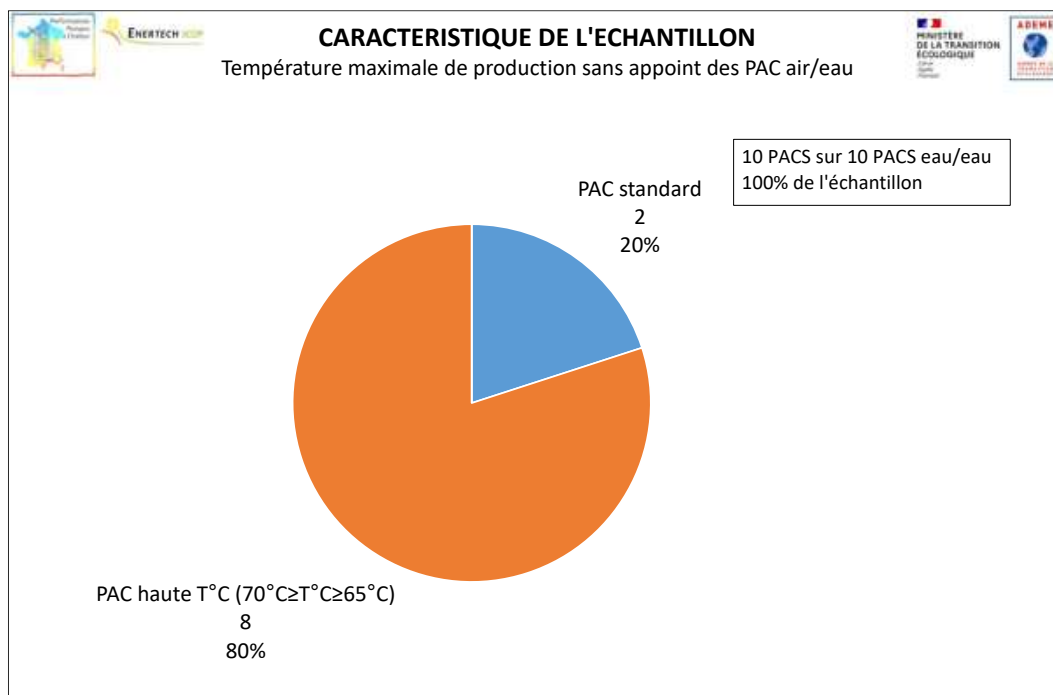


Figure 29 : Répartition de la température maximale de production sans appoint des PAC eau/eau

3.3.3. Fluides frigorigènes

La répartition des fluides rencontrée est présentée en Figure 30.

51% des PAC installées utilisent des fluides frigorigènes R407C et R410A qui seront interdits de mise sur le marché pour les systèmes de climatisation bi-blocs contenant moins de 3 kg de HFC à partir du 1^{er} janvier 2025. Les 3 systèmes utilisant le R407C sont des PAC eau/eau.

Viennent ensuite (34%) les PAC au R32 dont l'empreinte environnementale est très inférieure à celle du R410A (GWP 3 fois inférieur et efficacité énergétique plus élevée).

Les PAC bi-bloc utilisant une combinaison de R410A (unité extérieure) et R134a (unité intérieure) - fluides autorisés jusqu'en 2027¹⁵ - sont exclusivement des modèles haute température (voire très haute température : 80°C).

Enfin, l'échantillon comporte 9 systèmes fonctionnant au propane (R290) qui est le fluide frigorigène présentant le GWP le plus faible (GWP de seulement 3).

¹⁵ <https://lagff.com/le-mag/f-gas-on-fait-le-point>
<https://www.gesec.fr/nouveau-reglement-f-gas-3-quels-changements-en-2024/>

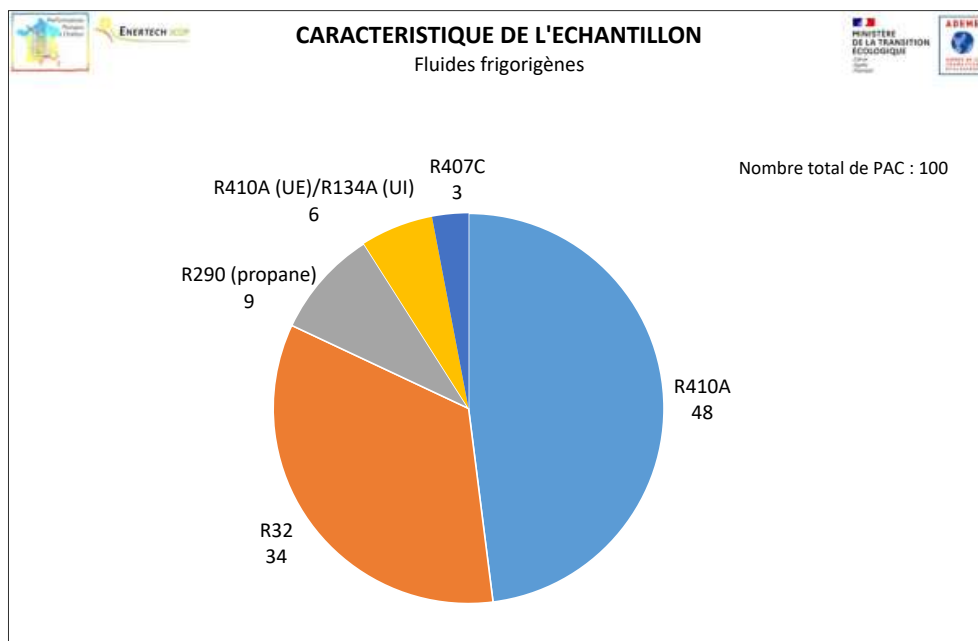


Figure 30 : Description des fluides frigorigènes utilisés par les PAC de l'échantillon

3.3.4. Configurations hydrauliques

Les configurations hydrauliques rencontrées sont très nombreuses, du fait des variantes possibles en production d'ECS (ECS déportée, intégrée ou indépendante de la PAC) mais aussi et surtout en production de chauffage :

- Présence ou non d'une bouteille de découplage, qui occasionne la présence de circulateurs secondaires et découple potentiellement la température de départ des circuits de celle produite par la PAC.
- Type de circuits de chauffage : plancher chauffant seul (qui permet un abaissement de la température produite), circuit(s) radiateur(s) seul(s) qui nécessite(nt) une température de production plus élevée, ou configuration mixte qui impose la présence d'une vanne trois voies (V3V) sur le circuit plancher et une température de production adaptée aux radiateurs.

Le Tableau 11 et la Figure 31 illustrent les configurations rencontrées.

En PAC double service, les deux configurations les plus répandues sont celles avec ballon ECS intégré et radiateurs (sans plancher), avec ou sans découplage (67% des cas). En PAC simple service on retrouve la même tendance avec 77% des cas.

On trouve la présence d'une bouteille de découplage sur la distribution de chauffage dans 44% des installations (1^{er} exemple en Figure 31).

Enfin - non mentionné dans le Tableau 11 - un ballon tampon a été ajouté en série sur le circuit de chauffage sur 20% des installations (non munies d'une bouteille de découplage) pour simplement augmenter le volume d'eau sur lequel travaille la PAC (3^e exemple en Figure 31).

Aucun volume d'eau additionnel n'a donc été installé dans environ un tiers des cas (2^e exemple en Figure 31).

Nous identifions un problème potentiel sur le volume d'eau du circuit dans 7 cas, par rapport aux exigences du constructeur (Tableau 12). Un ballon tampon est pourtant présent sur 3 de ces 7 cas.

Config. Chauffage →		Circuit plancher seul sans V3V		Circuit plancher sur V3V + circuit(s) radiateur(s)		Circuit(s) radiateur(s) seul(s) sans V3V			
↓									
Production chauffage / ECS	Double service - ECS déportée								Total :
		Avec bouteille de découplage	A	1	B	2	C	2	5
		Sans bouteille de découplage	D	2	E	1	F	3	6
	Double service - ECS intégrée								
		Avec bouteille de découplage	G	1	H		I	19	20
		Sans bouteille de découplage	J	6	K	2	L	22	30
	Simple service								
		Avec bouteille de découplage	M	3	N	3	O	13	19
		Sans bouteille de découplage	P	3	Q		R	17	20
Total :		16		8		76		100	

Tableau 11 : Configurations hydrauliques rencontrées¹⁶.

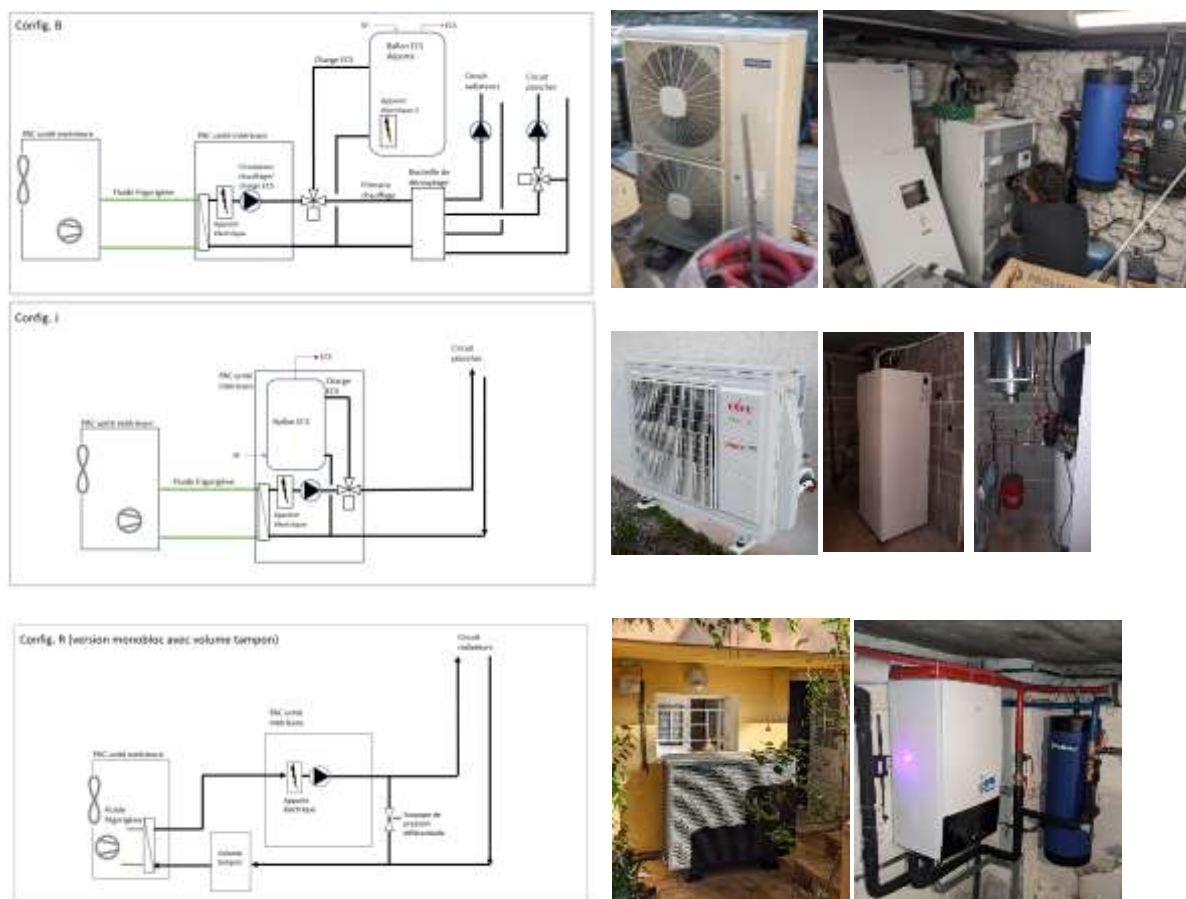


Figure 31 : Illustration de 3 configurations hydrauliques (B, J et R en monobloc)

¹⁶ Pour simplifier le tableau les émetteurs spécifiques (ventilo-convecteur pour 1 logement et batterie de chauffage CTA pour 1 autre) ont été assimilés ici à des radiateurs.

3.3.5. Anomalies rencontrées sur site

Quelques problèmes d'installations, fonctionnement ou prise en main ont pu être détectés lors de la visite d'instrumentation. Nous les listons ci-dessous (Tableau 12). Dans certains cas la mesure permettra d'en confirmer ou d'en infirmer l'impact.

Logement	Problème constaté	Impact potentiel
044065	PAC simple service dont le retour chauffage passe dans l'échangeur d'un chauffe-eau solaire thermique avec appoint électrique.	Sur-sollicitation de la production ECS et sous-sollicitation de la PAC (réchauffage du retour donc dégradation du COP). Usure prématurée de la résistance (changée déjà 2 fois préalablement à l'instrumentation).
083059	Thermostat mal raccordé dans la PAC (il est toujours en demande de chaleur) + pas de loi d'eau (régulation à température départ constante élevée de 54°C).	Très courts cycles observés sur cette installation (quelques secondes) + un talon de consommation de 1kW environ en permanence.
086034	Inversion départ et retour chauffage.	Les radiateurs sont alimentés à l'envers : mauvaise diffusion de la chaleur.
012088	Fuite importante sur le circuit d'eau glycolée de cette PAC monobloc.	Manque d'eau glycolée régulier. Adjonction d'eau pure pour assurer la continuité de fonctionnement, ce qui dilue le mélange eau/glycol pouvant mener au gel de l'installation.
015088	Fuite au niveau du réseau de chauffage au départ de la PAC.	Baisse de pression du réseau, défauts intempestifs avec le besoin de compléter en eau souvent + flaques d'eau à nettoyer régulièrement.
007075	COP très faible constaté par mesure instantanée (COP< 1). Problème identifié : manque de fluide frigorigène.	Fonctionnement de la PAC à bas rendement, surconsommations énergétiques et factures élevées.
057029	Fuite de fluide frigorigène à l'intérieur de l'unité intérieure de la PAC.	A terme, fonctionnement de la PAC à bas rendement, surconsommations énergétiques et factures élevées.
002026	Fonctionnement en courts cycles (froid) lors de l'instrumentation, du fait de l'ouverture trop lente d'une V3V.	Surconsommation, usure prématurée.
058029	Fil raccordant la sonde de température extérieure à la PAC débranché.	Température extérieure non remontée à la PAC qui fonctionne sans loi d'eau (à température constante).
042065 004026	Lourd défaut de compréhension du fonctionnement du thermostat par l'occupant. Sur un cas, 13°C réglé en consigne d'ambiance.	Sous-chauffes ou surconsommations selon le réglage paramétré de façon involontaire.
079050	Le thermostat d'ambiance n'est pas capté par la PAC (liaison radio).	Fonctionnement de la PAC avec loi d'eau seulement, sans influence ou coupure liée à la température intérieure. Surconsommations.

063083	L'épingle électrique chauffage n'est pas déclarée dans le paramétrage de la PAC.	La résistance électrique chauffage ne se déclenchera jamais.
050040 074084	Pas de loi d'eau paramétrée dans la PAC : fonctionnement à température constante.	Surconsommations énergétiques importantes et factures élevées.
051015	Pas de thermostat d'ambiance et la loi d'eau paramétrée est très élevée (-5/59°C et 15°C/50°C).	Surconsommations énergétiques importantes et factures élevées.
075084	Résistance électrique disjonctée physiquement via un disjoncteur interne (dans l'UI de la PAC). Non su par l'occupant.	La résistance électrique chauffage ne se déclenchera jamais.
052015	Résistances électriques chauffage et ECS disjonctées au tableau de la maison. Non su par l'occupant.	Les résistances électrique chauffage et ECS ne se déclencheront jamais.
004026	Evacuation des condensats au niveau de l'UE mal raccordée.	Des flaques d'eau se forment dans le passage, devenant verglacées en hiver.
005026	Problèmes de surpressions dans le réseau.	La PAC recrache des quantités importantes d'eau au niveau de l'UI.
096016	Recyclage au niveau du primaire de la bouteille de découplage.	La température de départ chauffage est faible, sous-chauffe des espaces.
034073	Veille importante anormale détectée par l'occupant (30W). Sans explications à ce jour.	Surconsommations énergétiques.
052015	Très légères fuites au niveau de raccords montés d'usine à l'intérieur de la PAC. Problèmes similaires constatés sur d'autres PAC de la même marque.	Baisse de pression du réseau, défauts intempestifs avec le besoin de compléter en eau régulièrement.
088034	Baisse de pression régulière sur les réseaux hydrauliques (alertes régulières sur la PAC).	Arrêt intempestif possible de la PAC.
004026 ; 007075 ; 009075 ; 010075 ; 023062 ; 029069 ; 037049 ; 042065 ; 044065 ; 055015 ; 058029 ; 061083 ; 064083 ; 067057 ; 068057 ; 070057 ; 086034	UE installée proche d'un obstacle induisant potentiellement un important recyclage d'air.	Surconsommation de la PAC, givrage plus fréquent + sonde extérieure mesurant une température anormalement basse.

006075 024062 042065 047040 050040 067057 099016	Volume d'eau du réseau¹⁷ (incluant ballon tampon) trop faible par rapport aux préconisations constructeurs. 90L estimés au lieu de 120L préconisés 32L estimés au lieu de 77L préconisés 100L estimés au lieu de 160L préconisés 28L estimés au lieu de 38L préconisés 82L estimés au lieu de 120L préconisés 32L estimés au lieu de 80L préconisés 24L estimés au lieu de 90L préconisés	Risque de courts-cycles à surveiller. A noter que deux fabricant, représentant 5 logements sur ces 7, exigent un volume d'eau supérieur à celui des autres fabricants (à savoir 10L/kW pour logts 006 ; 024 ; 042 ; 050 ; 099).
Très récurrent	Des bouteilles de découplages sont très souvent utilisées dans la mise en œuvre des PAC. La plupart de ces bouteilles ne respectent pas la règles des « 3D ». L'équilibre des débits primaire/secondaire est rarement assuré d'après nos mesures.	Risque de cyclage excessif des PAC ou de sous-chauffe des départs de chauffage au secondaire des bouteilles.

Tableau 12 : Liste de problèmes rencontrés sur certaines installations de l'échantillon



070057 : l'unité extérieure est installée sous un appentis dans une zone confinée. Un recyclage d'air important est mesuré sur cet équipement : la température mesurée par notre station météorologique placée à proximité de l'UE chute dès que la PAC se met en route.



037049 : un cache peu ajouré sur ses parties latérales est installé sur l'unité extérieure qui perturbe le cheminement du flux d'air.

¹⁷ Hypothèse de calcul pour les cas litigieux présentés ici : 2 litres par radiateur puis volume multiplié par deux pour prendre en compte le volume de la distribution.



042065 : les occupants ont installé des objets encombrants devant l'unité extérieure qui perturbent fortement le cheminement du flux d'air.



067057 : l'unité extérieure n'est pas installée à l'air libre, ce qui nuit à l'échange de calories avec l'air extérieur.

Figure 32 : Illustration des écueils observés sur le positionnement de l'unité extérieure

Une partie des occupants jugent comme disgracieuses les unités extérieures. Ainsi, plusieurs ont été camouflées avec des caches plus ou moins ajourés par les participants de l'étude. Dans le cas où ils sont peu ajourés, les caches mis en place perturbent le cheminement du flux d'air autour de l'unité extérieure, ce qui induit des surconsommations, un givrage plus fréquent et une mesure de température anormalement basse pour la sonde extérieure (bien souvent installée derrière les ventilateurs de l'UE).

Les grandes enseignes de bricolage vendent aujourd'hui des caches qui, au regard des constats du paragraphe précédent, grèvent la performance des pompes à chaleur air/eau sur lesquelles ils sont installés. Ce constat est généralisable aux autres installations qui possèdent des unités extérieures semblables, comme certains chauffe-eaux thermodynamiques sur air extérieur et les pompes à chaleur air/air notamment.



Figure 33 : Exemples de caches vendus par les grandes enseignes de bricolage pour camoufler les unités extérieures

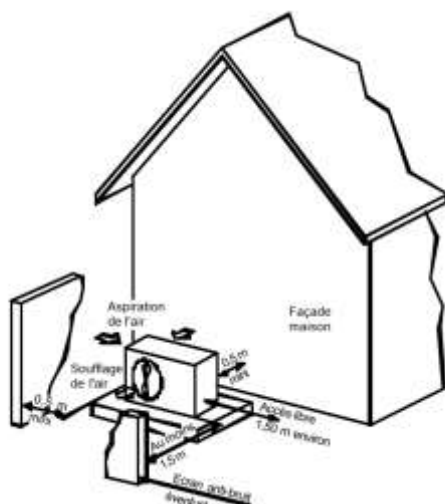


Figure 34 : Les bonnes pratiques à respecter pour le positionnement de l'unité extérieure¹⁸

3.3.6. Niveau de calorifuge des installations

Les niveaux de calorifuge des canalisations chaudes est très hétérogène, que ce soit au niveau des panoplies hydrauliques (Figure 35) ou à l'intérieur-même des PAC. Ce point pourra faire l'objet de recommandations spécifiques.



Figure 35 : Illustration de différents niveaux de calorifugeage des installation (à gauche non calorifugé, à droite bien calorifugé)

3.3.7. Emetteurs de chaleur

Les émetteurs de chaleur rencontrés sont illustrés en Figure 36. Les trois quarts des logements (**74%**) sont équipés **uniquement** de **radiateurs**, répartis de la façon suivante :

- 24% en fonte (émetteurs non rénovés)
- 54% en acier ou en aluminium (émetteurs plus récents)
- 21%, mélange de fonte et d'acier ou d'alu (installation partiellement rénovée).

¹⁸ Guide AFPAC – Costic : Les pompes à chaleur dans l'existant, règles techniques et conseils pratiques de mise en œuvre.

24% des logements disposent d'un plancher chauffant, soit en tant qu'unique émetteur (deux tiers des cas) soit en configuration mixte avec des radiateurs (un tiers des cas). Sur ces 24 cas :

- 8 logements sont en PAC eau/eau : logts 18,19,34,40,45,46,72,73.
- 10 logements ont fait réaliser leur plancher chauffant en même temps que l'installation de PAC à l'occasion d'une rénovation lourde : logts 13,14,18,19,46,72,73,80,85,93.

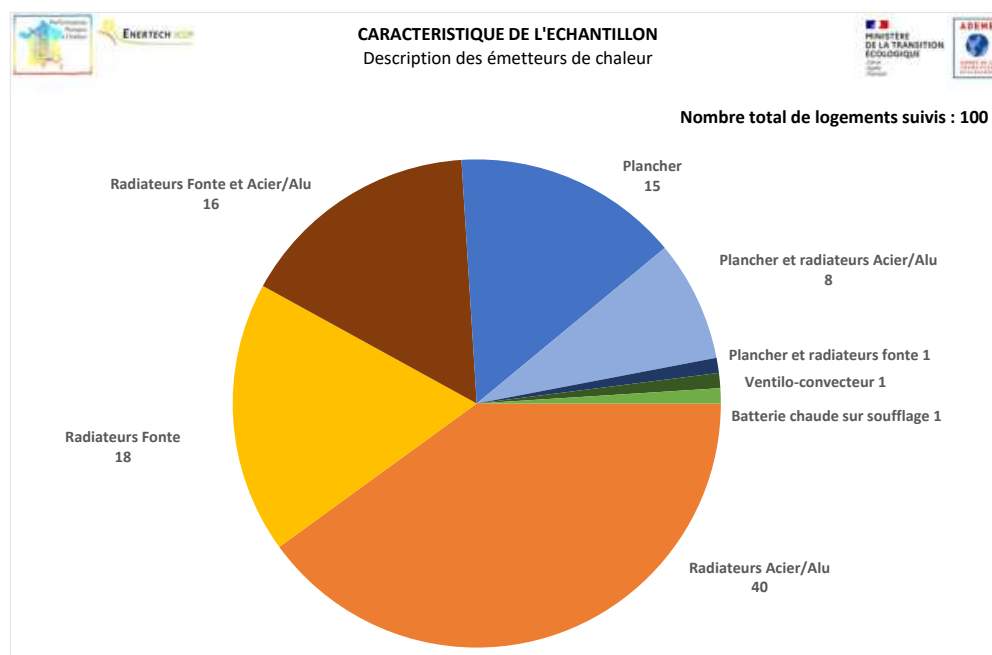


Figure 36 : Description des émetteurs de chaleur dans les logements de l'échantillon

En rapprochant les types d'émetteurs rencontrés des niveaux de température possiblement produits par les PAC pour le chauffage, il semblerait que le type d'émetteur en place n'est aujourd'hui pas (ou très peu) pris en compte dans les critères de sélection des PAC.

En effet, nous aurions pu nous attendre à observer une part plus importante de planchers pour les PAC « standards » ($<65^{\circ}\text{C}$) que pour les PAC « haute et très haute température » ($\geq 65^{\circ}\text{C}$), ces émetteurs fonctionnant à basse température.

Or, le croisement de ces deux informations sur notre échantillon ne va pas dans ce sens, puisque 20% des émetteurs rencontrés pour les 34 PAC « haute et très haute température » sont des planchers seuls. Cette proportion est de seulement 12% en considérant les PAC « standard ».

A l'inverse, les radiateurs en fonte, généralement associés à des hautes températures de production de chauffage (gros radiateurs, bâti ancien), représentent 15% des émetteurs rencontrés pour les PAC « haute et très haute température », et 20% de ceux rencontrés pour les PAC « standard ». Là aussi, la tendance observée va à l'encontre de ce que nous aurions pu présupposer.

Nous verrons par ailleurs en partie 2 (résultats de mesure) que les PAC haute température de l'échantillon ne correspondent pas du tout systématiquement aux logements affichant les lois d'eau de chauffage les plus chaudes ou aux températures de production ECS les plus élevées.

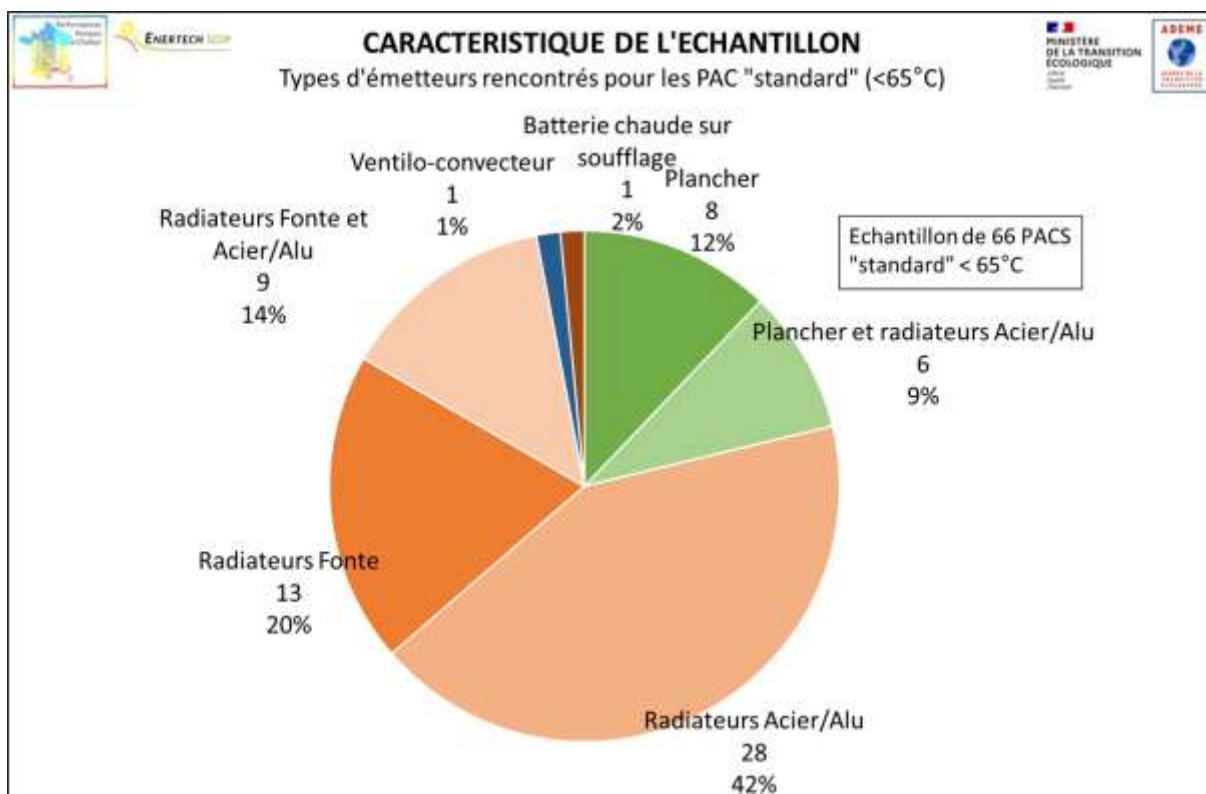


Figure 37 : Types d'émetteurs rencontrés pour les PAC « standards » (< 65°C)

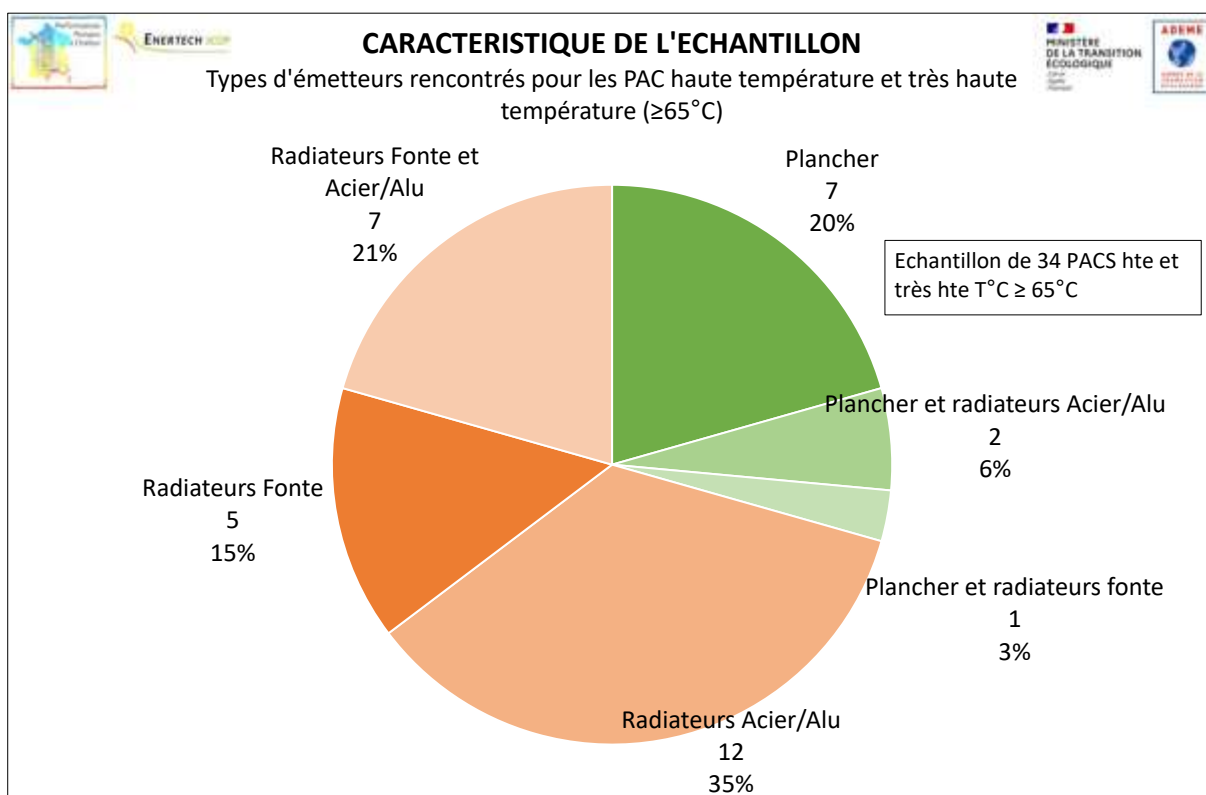


Figure 38 : Types d'émetteurs rencontrés pour les PAC haute température ($70 > T^\circ\text{C} \geq 65$) et très haute température (≥ 70)

3.3.8. Régulation terminale

Thermostat principal



Dans 85% des cas un thermostat (dans la majorité des cas sans fil) est relié à la pompe à chaleur et se trouve dans la pièce de vie principale ou à proximité.

Parmi les 15% de cas où on ne trouve pas thermostat principal :

- 5 cas en seront théoriquement bientôt équipé (approvisionnement en cours). Logements concernés : 029069 ; 038049 ; 051015 ; 065083 ; 068057 (1 Fabricant 4, 1 fabricant 7, 2 fabricant 2)
- 10 cas sont réellement prévus sans thermostat, avec un pilotage de la PAC sur température extérieure uniquement et en général avec une estimation de la température intérieure ce qui mériterait une analyse spécifique. Logements concernés : 016067 ; 036049 ; 040049 ; 046065 ; 058029 ; 066057 ; 069057 ; 088034 ; 094052 ; 099016 (6 PAC du fabricant 2 dont 1 eau/eau, 1 fabricant 7, 1 fabricant 3, 1 fabricant 8, 1 eau/eau fabricant 21). Tous ces logements ne disposent que d'un circuit radiateur exceptés les logements 040049 et 046065 qui ne disposent que d'un circuit plancher chauffant.

NB : Le thermostat principal influe de manière dynamique sur la loi d'eau de production de chauffage dans de nombreux cas (cf. partie 2, §2.1.3.2), ce qui permet d'ajuster cette dernière en fonction du besoin. Ce procédé nous semble « clé » dans l'optimisation de la loi d'eau, même s'il nécessite un bon réglage initial de la loi d'eau pour bien fonctionner.

Régulation terminale radiateurs



On trouve des robinets thermostatiques terminaux sur 88% des circuits radiateurs. Dans 55% des cas tous les radiateurs sont équipés, dans 45% des cas certains radiateurs sont irrigués en permanence (souvent dans la pièce où se trouve le thermostat de la PAC).

Les 12% de circuits radiateurs équipés uniquement de robinets manuels sont tous dans des configurations où la régulation terminale est assurée par le thermostat de la pièce principale (ce qui signifie que les autres pièces n'ont pas de régulation terminale) sauf dans un cas (logement 73084) où le circuit radiateur d'étage est en circulation permanente et sans thermostat, avec une loi d'eau de tête.

Régulation terminale planchers

Tous les planchers sont régulés grâce au thermostat de la PAC placé dans la pièce principale, sauf dans 2 logements (cf. ci-dessus). La régulation terminale des planchers chauffants du logement 046065 est réalisée par marche/arrêt avec des thermostats par pièce pilotant des vannes motorisées sur la nourrice de distribution.

3.3.9. Production d'eau chaude sanitaire

Rappelons que l'échantillon comporte 61 PAC double service (55 air/eau et 6 eau/eau) et 39 productions ECS indépendantes.

Le détail des productions d'ECS rencontrées est présenté en Figure 39 :

- 50 PAC possèdent un ballon ECS intégré et 11 un ballon ECS déporté.
- Dans le cas où la PAC ne sert qu'à faire le chauffage, l'eau chaude sanitaire est produite dans 44% des cas par un cumulus électrique et 33% par un chauffe-eau thermodynamique, le reste des logements (23%) utilise un chauffe-eau solaire avec un appoint électrique - joule ou thermodynamique.

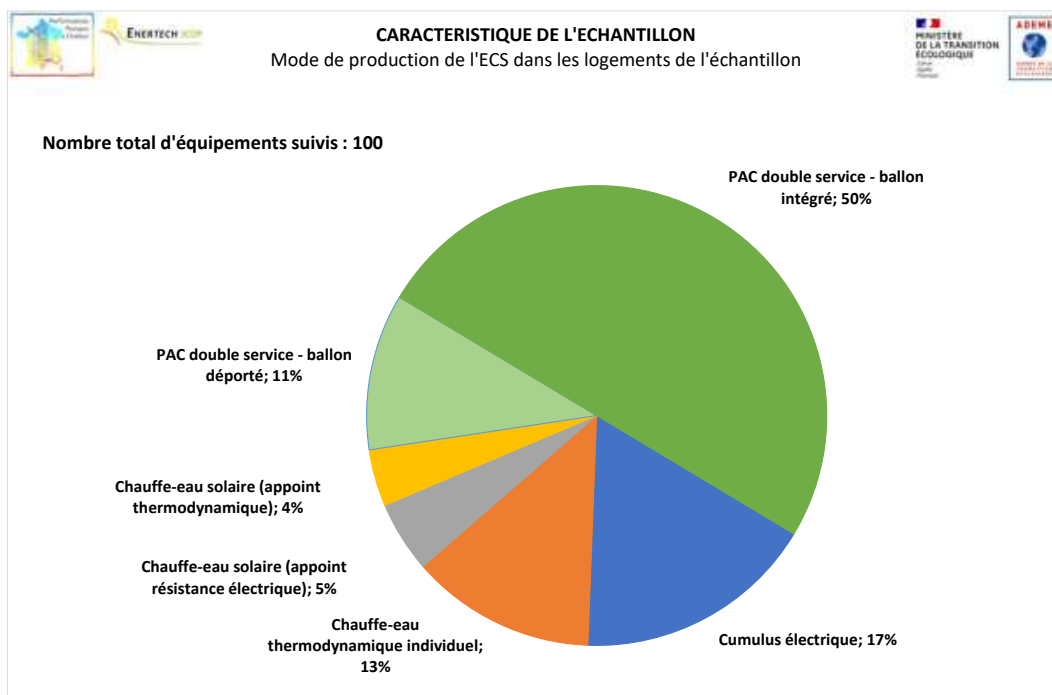


Figure 39 : Mode de production de l'ECS dans les logements de l'échantillon

3.3.10. PAC connectées

24% des PAC de l'échantillon sont effectivement connectées (utilisation d'une application sur smartphone). Cette fonctionnalité est plus courante sur les PAC eau/eau (60% de l'échantillon) que sur les modèles air/eau (20%).

Les fonctionnalités les plus utilisées semblent être :

- La prise en main à distance par l'installateur ;
- Le pilotage à distance par l'utilisateur (en cas d'absence du logement notamment) ;
- Le pilotage quotidien du chauffage ;
- L'observation des paramètres de fonctionnement (en général consigne d'ambiance, température ambiante, température extérieure, programmation horaire, température ECS, consommation d'énergie).

4 foyers déclarent avoir utilisé l'application, au début, après la mise en service de la PAC mais ne plus s'en servir maintenant.

Nous avons demandé aux fabricants quelles options de connectivité étaient disponibles sur les PAC de l'échantillon. Il apparaît que l'écrasante majorité des PAC présentent une solution de connectivité à destination de l'utilisateur. Près d'un quart des PAC présentent cette connectivité de série, deux-tiers en option.

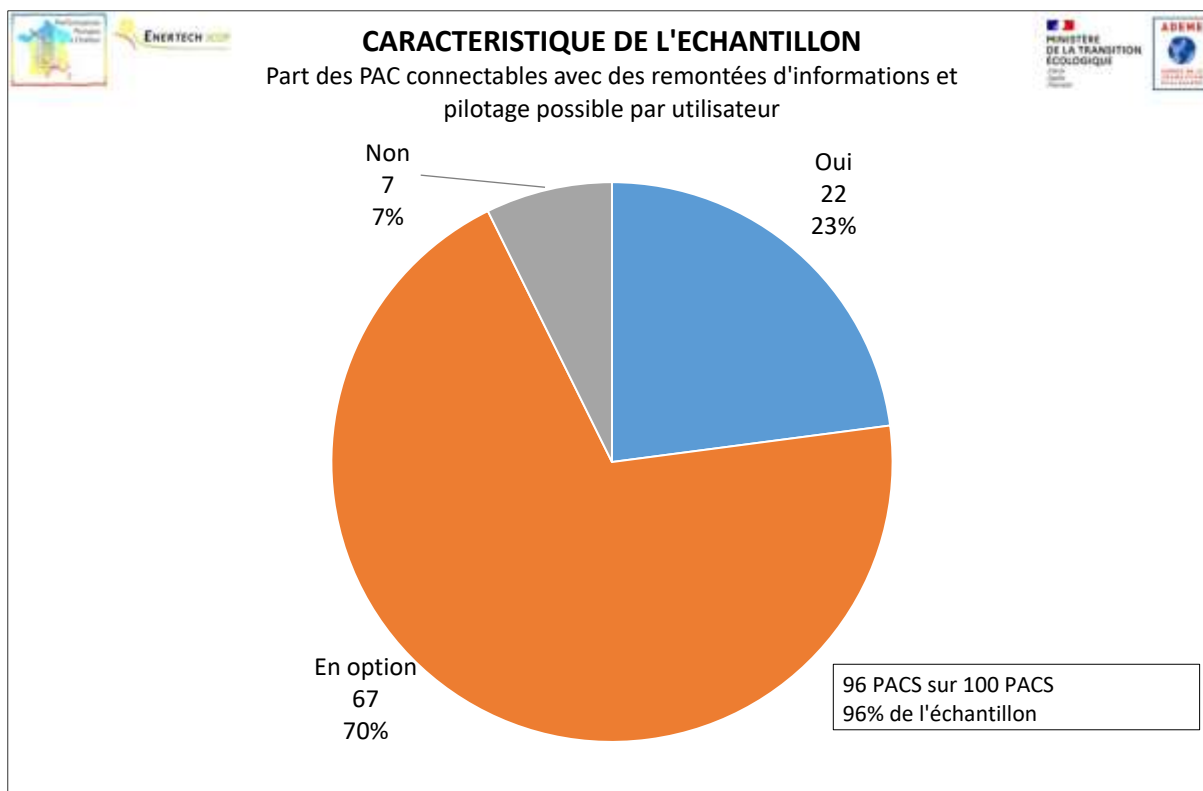


Figure 40 : Part des PAC connectables avec remontées d'informations et pilotage possible par l'utilisateur

Concernant la possibilité pour **l'installateur** de se connecter à distance à l'installation : cela est possible de série pour 15% des cas ; possible en option pour 54% des cas ; impossible pour 31% des cas.

Concernant la possibilité pour **le fabricant** de se connecter à distance à l'installation : cela est possible de série pour 19% des cas ; possible en option pour 34% des cas ; impossible pour 47% des cas.

	PAC connectée avec remontée d'information et pilotage possible par utilisateur	PAC connectée avec remontée d'information pour l'installateur	PAC connectée avec remontée d'information pour le fabricant
Oui	22 logts - 23 %	12 logts - 15 %	18 logts - 19 %
En option	67 logts - 70 %	42 logts - 54 %	32 logts - 34 %
Non	8 logts - 8 %	25 logts - 31 %	45 logts - 47 %
Total réponses	97	79	95

Tableau 13 : Caractère « connectable » des PAC de l'échantillon.

3.3.11. Fabricants

Les PAC de l'échantillon sont issues de 23 fabricants différents. Quatre d'entre eux regroupent près de la moitié des unités rencontrées. En ajoutant les quatre suivants, on couvre près de 80% de l'échantillon (Figure 41).

Seul un fabricant a été retrouvé à la fois sur des PAC air/eau (13 unités) et sur des PAC eau/eau (4 unités).

Au total 11 fabricants n'ont été rencontrés qu'une seule fois :

- 4 sur des installations eau/eau
- 7 sur des installations air/eau

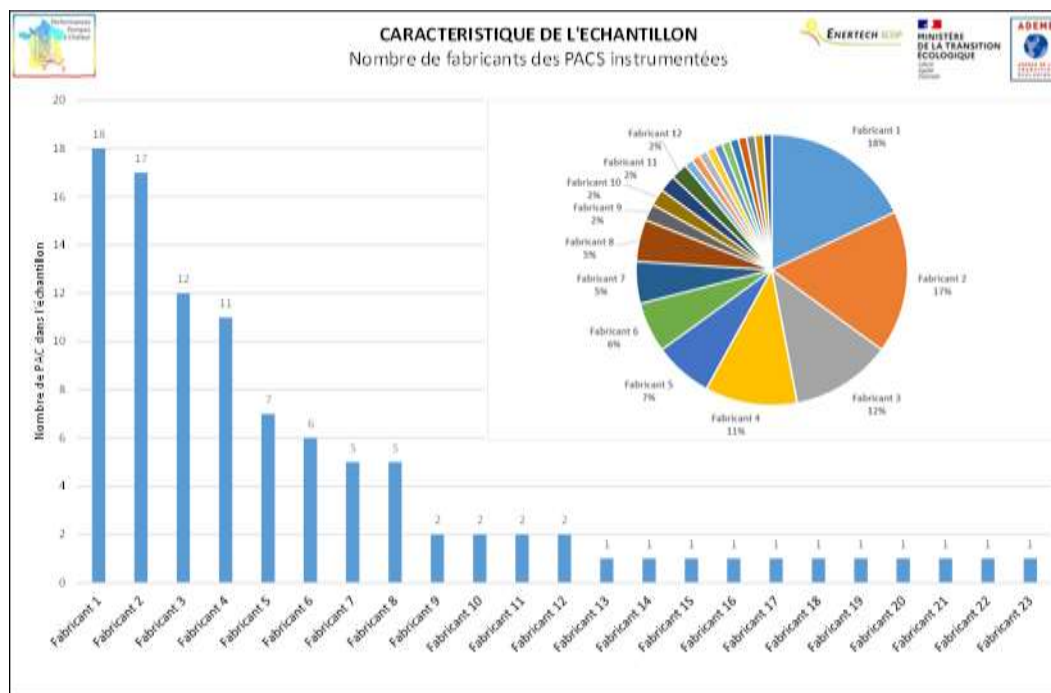


Figure 41 : Répartition des différents fabricants des PAC instrumentées

Au niveau de la répartition géographique des fabricants rencontrés dans notre échantillon on constate (logiquement) une hétérogénéité assez grande des répartitions par zones climatiques (Tableau 14). Toute comparaison directe de COP annuel entre fabricant (qui n'est de toute façon pas l'objet du projet) serait donc très fortement biaisée.

	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3	Nombre d'unités
Fabricant 1	28%	6%	17%	17%	17%	11%	6%	18%	18
Fabricant 2	17%	29%	6%	18%	12%	12%	24%	17%	17
Fabricant 3	17%	42%	8%	8%	8%	17%	12%	12%	12
Fabricant 4	18%	18%	9%	9%	9%	18%	9%	11%	11
Fabricant 5	14%	43%	14%	29%	33%	6%	7%	7%	7
Fabricant 6	50%	17%	33%	33%	33%	33%	6%	6%	6
Fabricant 7	20%	20%	40%	40%	40%	40%	5%	5%	5
Fabricant 8	20%	50%	20%	60%	60%	60%	2%	2%	5
Fabricant 9	50%	50%	50%	50%	50%	50%	2%	2%	2
Fabricant 10	100%	100%	100%	100%	100%	100%	2%	2%	2
Fabricant 11	50%	50%	50%	50%	50%	50%	2%	2%	2
Fabricant 12	100%	100%	100%	100%	100%	100%	2%	2%	2
Fabricant 13	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 14	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 15	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 16	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 17	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 18	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 19	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 20	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 21	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 22	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1
Fabricant 23	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1%	1%	1

Tableau 14 : Distribution des fabricants de l'échantillon par type de zone climatique

3.3.12. Autres moyens de chauffage

Comme indiqué sur le graphique de la Figure 42, seuls **35%** des logements utilisent **exclusivement** leur PAC pour se chauffer. L'énergie d'**appoint** la plus commune est le **bois** :

- Bûches pour 37% (même proportion de poêles et d'inserts et légèrement moins de cheminées ouvertes) ;
- Granulés pour 11% (quasiment uniquement des poêles).

L'échantillon compte également 16% de logements qui utilisent en appoint un chauffage à effet joule (pour la plupart des sèche-serviettes électriques). Cette valeur est en fait sous-estimée car sur le graphique sont donnés uniquement les modes de chauffage d'appoint principaux. Dans plusieurs logements, en complément de l'appoint bois on trouve également un sèche-serviettes électrique.

Enfin, seuls 2 logements utilisent une chaudière en appoint soit lors de grands froids, soit lorsque l'électricité est chère (jour rouge du tarif tempo). *NB : Le logement qui utilise sa chaudière fioul en relève de sa PAC aurait normalement dû la déposer puisqu'il a bénéficié d'une aide CEE pour l'installation de sa PAC.*

L'utilisation de ces appoints est très différente d'un logement à l'autre. Nous essaierons, dans la mesure du possible, de quantifier leur contribution aux besoins de chauffage.

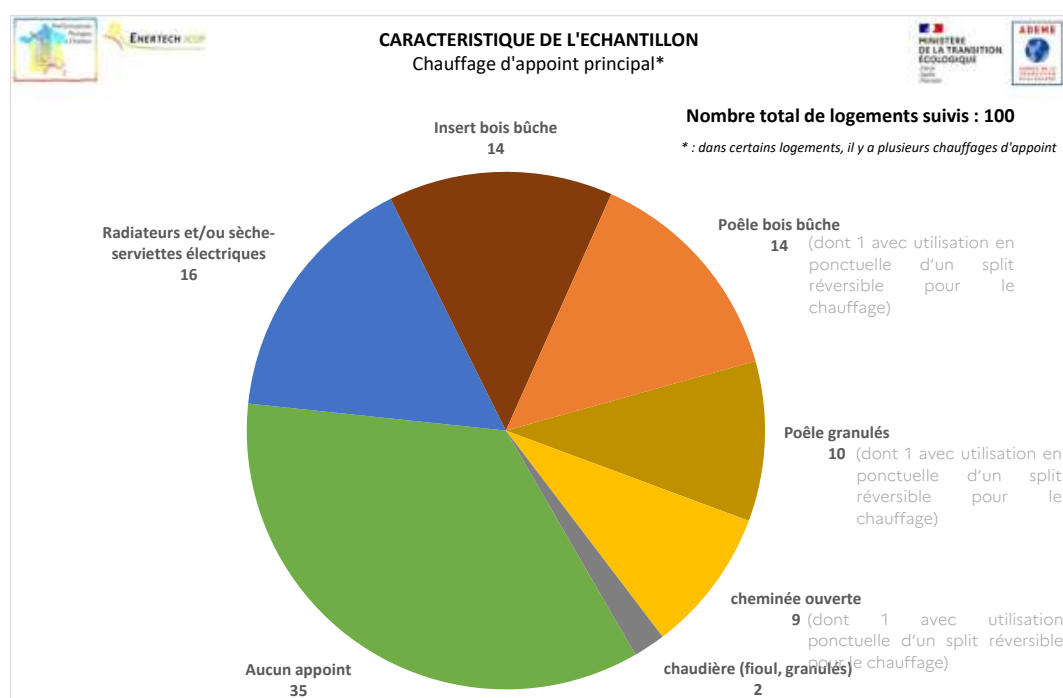


Figure 42 : Modes de chauffage d'appoint rencontrés dans les logements de l'échantillon

3.3.13. Systèmes de climatisation/rafraichissement

Du point de vue des machines, les PAC air/eau sont théoriquement réversibles sans aucune option complémentaire dans 75% des cas. Cela signifie que ces PAC peuvent être utilisées pour faire du rafraichissement de série, sans intervention sur l'équipement. Il est impossible de faire du rafraichissement pour 18% des PAC air/eau de l'échantillon. Sur une marque bien particulière, il est possible de faire du rafraichissement à condition d'installer un « kit de rafraichissement » qui est en option.

Pour les PAC eau/eau, elles peuvent toutes théoriquement être utilisées pour faire du rafraichissement, principalement de façon « passive » avec du géocooling. Pour certaines PAC, il est possible d'assurer un rafraichissement actif par la PAC en option (avec son circuit frigorifique) en complément du géocooling lorsqu'il ne suffit plus pour satisfaire la consigne. Pour d'autres, elles sont utilisables uniquement en rafraichissement actif, sans qu'il soit possible de faire du géocooling.

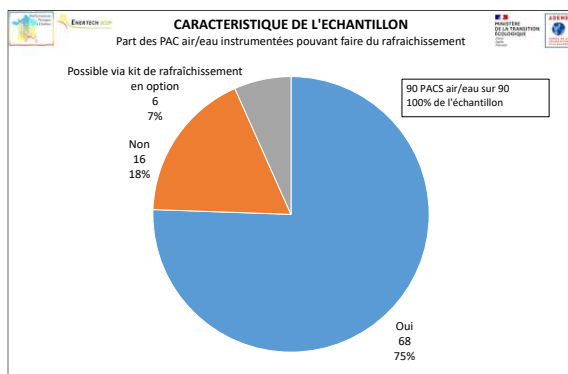


Figure 43 : Part des PAC air/eau instrumentées pouvant faire du rafraîchissement

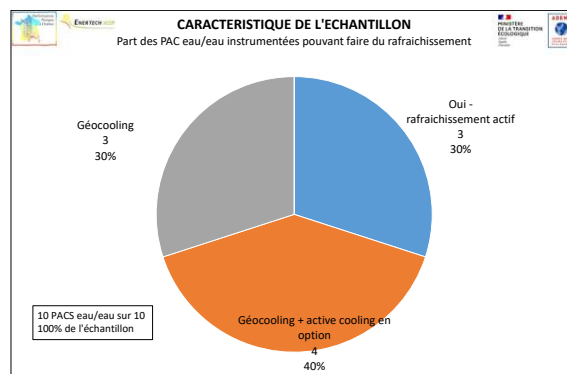


Figure 44 : Part des PAC eau/eau instrumentées pouvant faire du rafraîchissement

Malgré tout, seuls certains émetteurs sont susceptibles d'émettre du froid dans notre échantillon : les planchers chauffant/rafraîchissants, les ventilo-convecteurs et les batteries de CTA. Les radiateurs sont exclus.

En croisant le caractère réversible des PAC et le type d'émetteur présent dans chaque logement, 25 PAC pourraient faire du rafraîchissement, dont 9 PAC eau/eau. Au total, 96% des émetteurs compatibles avec une émission de froid (planchers, ventilo-convecteurs, batterie de soufflage de ventilation double flux) sont alimentés par une PAC réversible (seule une installation de plancher n'est pas alimentée par une PAC réversible).

Sur ces 25 installations « candidates », en définitive, **seules 14 PAC de l'échantillon, dont 8 PAC eau/eau, sont en pratique utilisées pour climatiser ou rafraîchir le logement**. En d'autres termes, sur les 25 installations qui pourraient faire du rafraîchissement ou de la climatisation, 56% sont véritablement utilisées pour cet usage en pratique. Parmi elles, 57% sont des PAC eau/eau, alors qu'elles représentent 10% de l'échantillon total.

Ces installations sont globalement réparties sur tout le territoire (cf. Figure 45).



Figure 45 : Localisation géographique des 14 PAC pouvant être utilisées pour climatiser/rafraîchir

NB : certains n'ont pas encore utilisé cette fonctionnalité car l'installation de la PAC est trop récente.

De plus, 14 logements climatisent leur logement à l'aide d'un ou plusieurs splits indépendants. Parmi ces 14 logements, un seul participant utilise en plus la climatisation de sa PAC.

Ces splits (tous réversibles) sont utilisés pour le chauffage en complément de la PAC instrumentée dans 4 logements, dont 1 de façon très exceptionnelle. Ce point fait l'objet d'annotations sur le graphique de la Figure 42.

3.3.14. Puissance acoustique des unités extérieures des PAC air/eau

Des méthodes de détermination du niveau de puissance acoustique des PAC sont définies par la norme NF EN 12102-1. Le niveau de puissance acoustique des unités extérieures des PAC air/eau a été demandé aux fabricants, ou relevé dans des fiches de données mesurées dans le cadre de la directive ERP (ou Ecodesign). Plusieurs valeurs de puissance acoustique sont présentées dans ces données, variant en fonction de la température de production ou des conditions climatiques.

Dans le cadre de cette étude, nous avons fait le choix de comparer les puissances acoustiques des unités extérieures à température moyenne de production (*medium temperature*) et dans des conditions climatiques moyennes (*average climate*). Il s'agit des conditions qui paraissent les plus représentatives du climat français et des températures de production des PACS de notre échantillon. Le résultat est présenté en Figure 46.



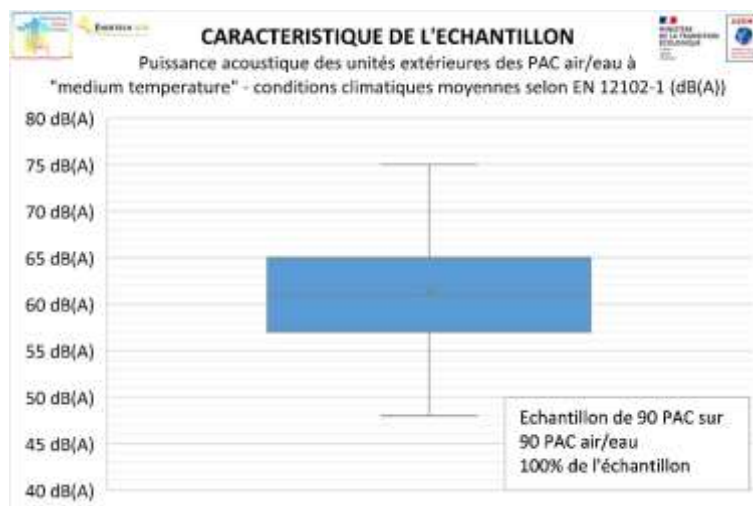


Figure 46 : Puissance acoustique des unités extérieures des PAC air/eau de l'échantillon

La puissance acoustique des unités extérieures de l'échantillon est très disparate (Figure 47), et vaut en moyenne 61,4 dB(A) (minimum : 48, maximum 75). La majorité des puissances acoustiques se situe entre 57 et 65 dB(A).

Dans la partie 3.4.7 traitant de la satisfaction relative au fonctionnement de la PAC, le bruit de l'unité extérieure fait partie des motifs d'insatisfaction les plus cités par les utilisateurs.

La puissance acoustique à « température moyenne » a été rapprochée de la puissance thermique à -7/55°C. Une tendance légèrement linéaire semble apparaître sur le graphique de la Figure 47 selon laquelle plus une PAC est puissante, plus la puissance acoustique émise au niveau de l'unité extérieure est importante. Le constat le plus flagrant est que dans notre échantillon de logements existants, à puissance équivalente, une PAC peut avoir une puissance acoustique allant de 53 dB(A) à 68 dB(A) environ. Cette plage de variation est assez importante, d'autant plus que l'échelle des décibels étant logarithmique, l'ajout de 3 décibels revient à doubler le niveau sonore.

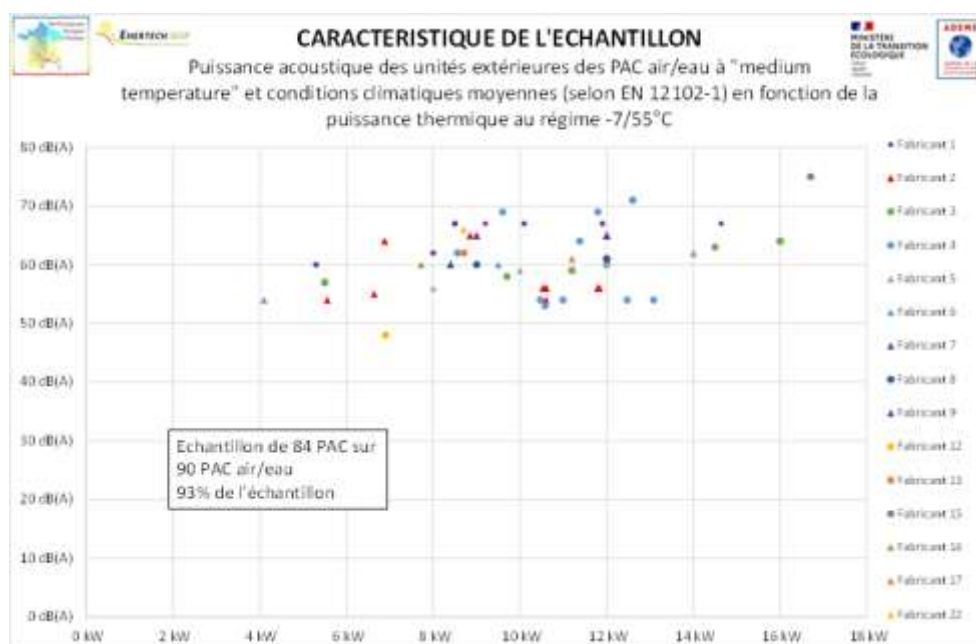


Figure 47 : Puissance acoustique des unités extérieures des PAC air/eau à "medium température" et conditions extérieures moyennes en fonction de la puissance thermique au régime -7/55°C

3.3.15. Comparaison des SCOP fabricant

Parmi les caractéristiques techniques fournies par les fabricants, le SCOP (coefficient de performance saisonnier) est celui qui répond le mieux au besoin d'évaluer la performance d'une PAC sur l'ensemble d'une saison de chauffe.

En effet, le SCOP, dont les méthodes d'essais sont définies par la norme NF EN 14825, est un indicateur prenant en compte diverses conditions de fonctionnement (dont la variation de la température extérieure et le fonctionnement à charge partielle de la PAC), ce qui le rend plus représentatif des conditions réelles de fonctionnement de la PAC sur une saison de chauffe entière. Plusieurs valeurs de SCOP existent pour une PAC, variant en fonction de la température de production ou des conditions climatiques. Trois climats européens peuvent être utilisés pour évaluer le SCOP : celui de Strasbourg pour un climat moyen, d'Athènes pour un climat chaud et d'Helsinki pour un climat plus froid. A savoir, le SCOP est calculé selon le profil moyen, la définition de cet indicateur aux climats plus froid et chaud étant optionnel¹⁹. Il est défini à 2 niveaux de température de production : basse température (35°C) et moyenne température (55°C).

Dans le cadre de cette étude, nous avons fait le choix de recueillir les SCOP basse et moyenne température (*Low* et *Medium temperature*) déterminés dans des conditions climatiques moyennes (*Average climate*). Il s'agit des conditions qui paraissent les plus représentatives du climat français et des températures de production des PACS de notre échantillon.

Sans surprise, il apparaît que les PAC eau/eau possèdent de meilleurs SCOP que les PAC air/eau (14% plus importants en moyenne, Figure 48).

Pour une même typologie de PAC, le SCOP à moyenne température est moins important que celui à basse température (-22% pour les air/eau, -23% pour les eau/eau).

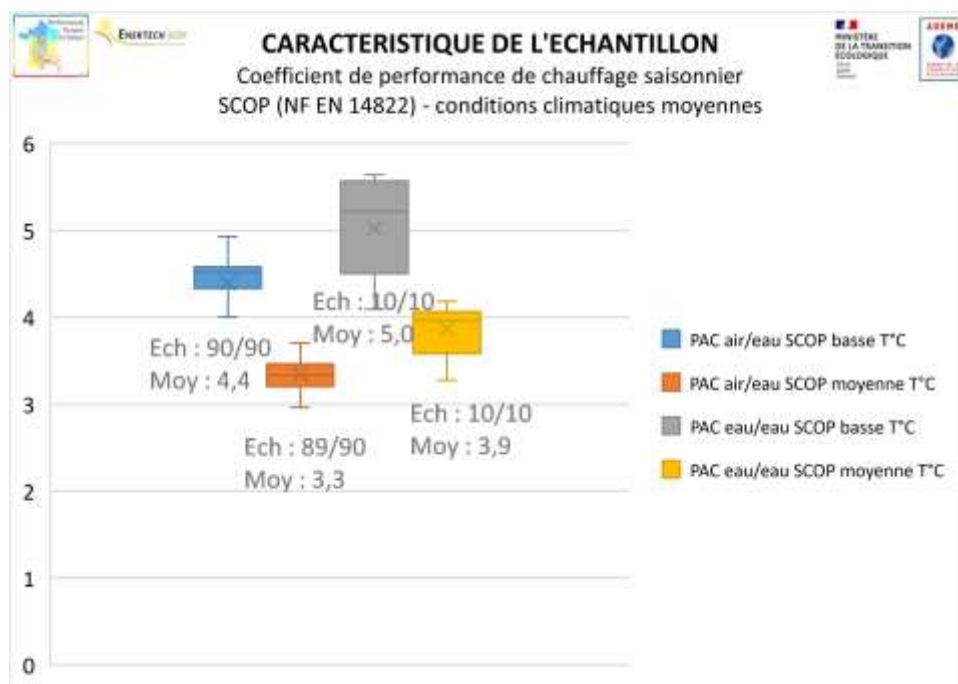


Figure 48 : Coefficient de performance de chauffage saisonnier (SCOP NF EN 14822, conditions climatiques A) des PAC de l'échantillon

¹⁹

<https://www.eurovent-certification.com/fr/category/article/understanding-seer-and-scop?universe=energy-efficiency>

Par souci de représentativité statistique de l'échantillon, la comparaison des SCOP en fonction de la température de production maximale de la PAC a été réalisée sur les air/eau uniquement. Les données collectées montrent que les SCOP à basse température des PAC « standard » sont plus performants que ceux des PAC « haute et très haute température ». A l'inverse, les SCOP à moyenne température des PAC « haute et très haute température » sont plus performants que ceux des PAC « standard ».

En rentrant dans le détail, nous remarquons que dans notre échantillon, 4 PAC très haute température ont un SCOP à basse température particulièrement faible (2,8 environ). Ces cas particuliers expliquent les minimums observés sur les diagrammes moustaches.

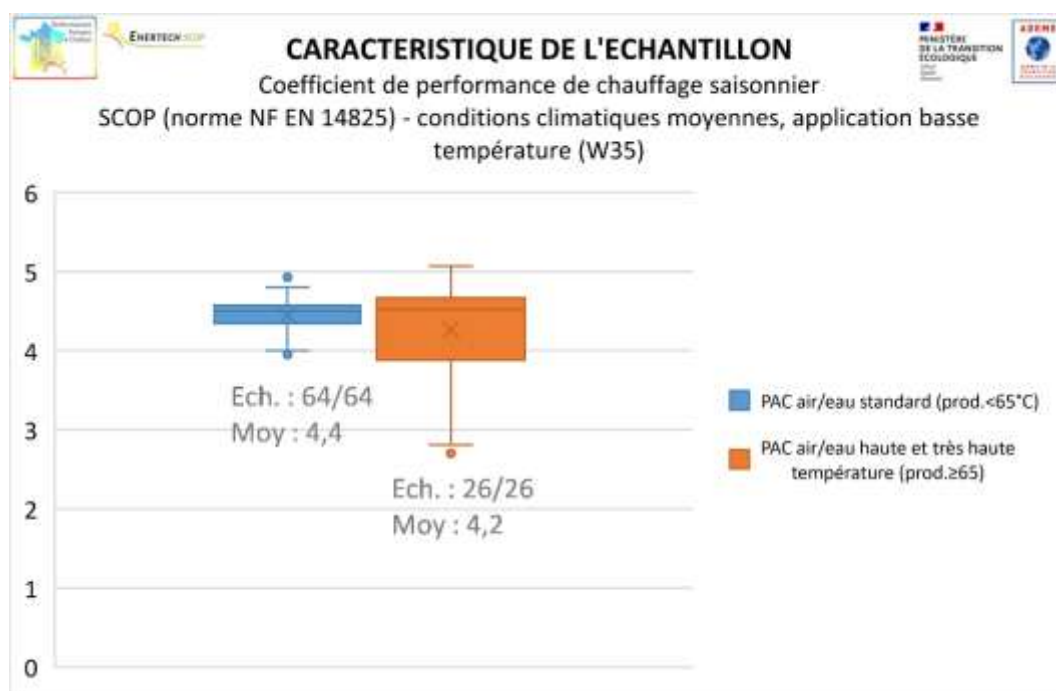


Figure 49 : SCOP à basse température pour les PAC air/eau "standard" et "haute et très haute température"

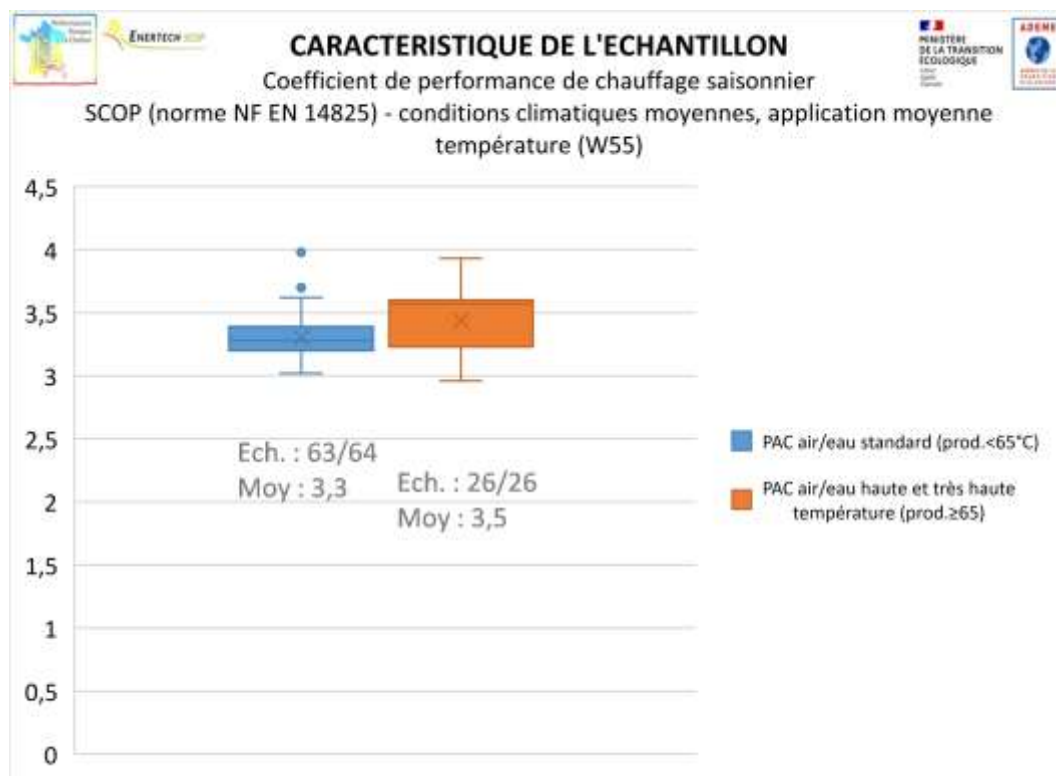


Figure 50 : SCOP à moyenne température pour les PAC air/eau "standard" et "haute et très haute température"

Les SCOP à basse et moyenne température ont été rapprochés respectivement des puissances thermiques à -7/35°C et -7/55°C (Figure 51 et Figure 52). Ces graphiques ne prétendent pas comparer les performances de chaque fabricant entre elles, étant donné qu'ils comparent des PAC de génération différentes. Ils permettent plutôt de poser un état des lieux sur notre échantillon et de donner une idée de ce qui se trouve aujourd'hui « sur le terrain », dans des logements ayant changé leur mode de chauffage pour une PAC air/eau.

A puissance équivalente, le SCOP à basse température d'une PAC varie entre 4 et 5, soit une variation de 20%. Le SCOP à moyenne température oscille quant à lui plutôt entre 3 et 3,5, soit une variation de 15% environ.

Ces plages de variation sont assez importantes puisqu'elles signifient que, sur le papier, deux PAC d'une puissance équivalente peuvent voir leurs consommations différer d'une vingtaine de pourcent uniquement par les caractéristiques intrinsèques des machines.

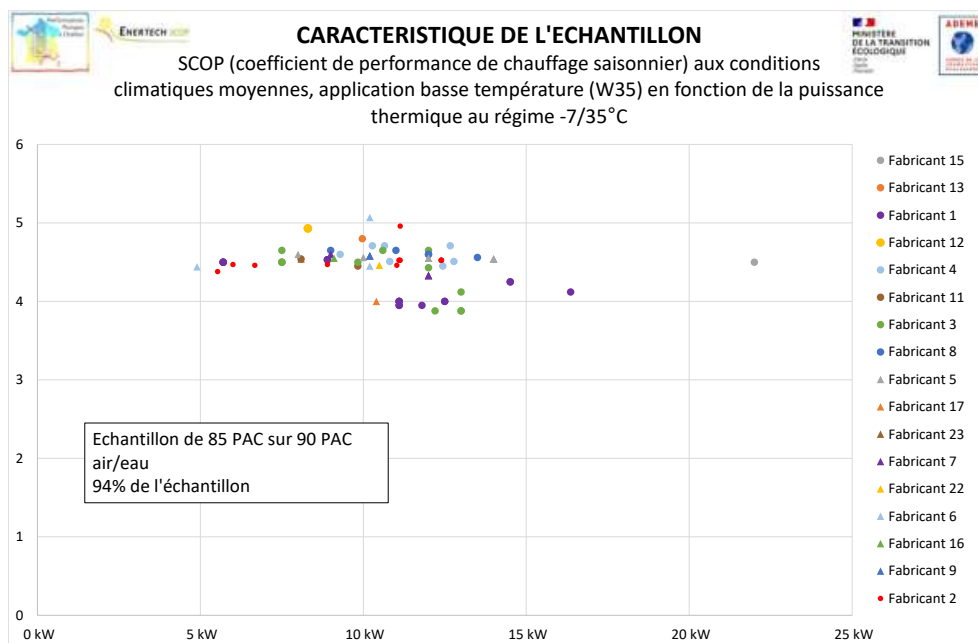


Figure 51 : SCOP aux conditions climatiques moyennes, application basse température (W35) en fonction de la puissance thermique -7/35

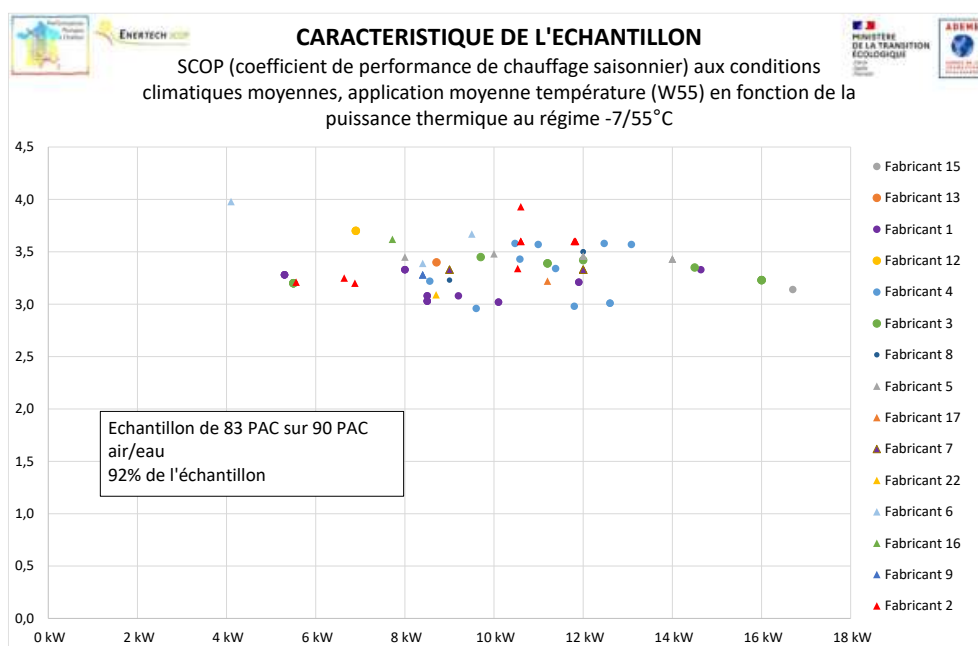


Figure 52 : SCOP aux conditions climatiques moyennes, application basse température (W55) en fonction de la puissance thermique -7/55

3.4. Le contexte d'installation des PAC de l'échantillon

3.4.1. Mode de chauffage avant travaux

Dans près de la moitié des logements (46%), la PAC a remplacé une chaudière fioul et dans une proportion similaire (43%) une chaudière au gaz. **Les PAC de l'échantillon ont donc remplacé une chaudière à combustible fossile dans près de 9 cas sur 10** (Figure 53).

On remarque aussi que 4 PAC ont été installées en remplacement d'une PAC existante.

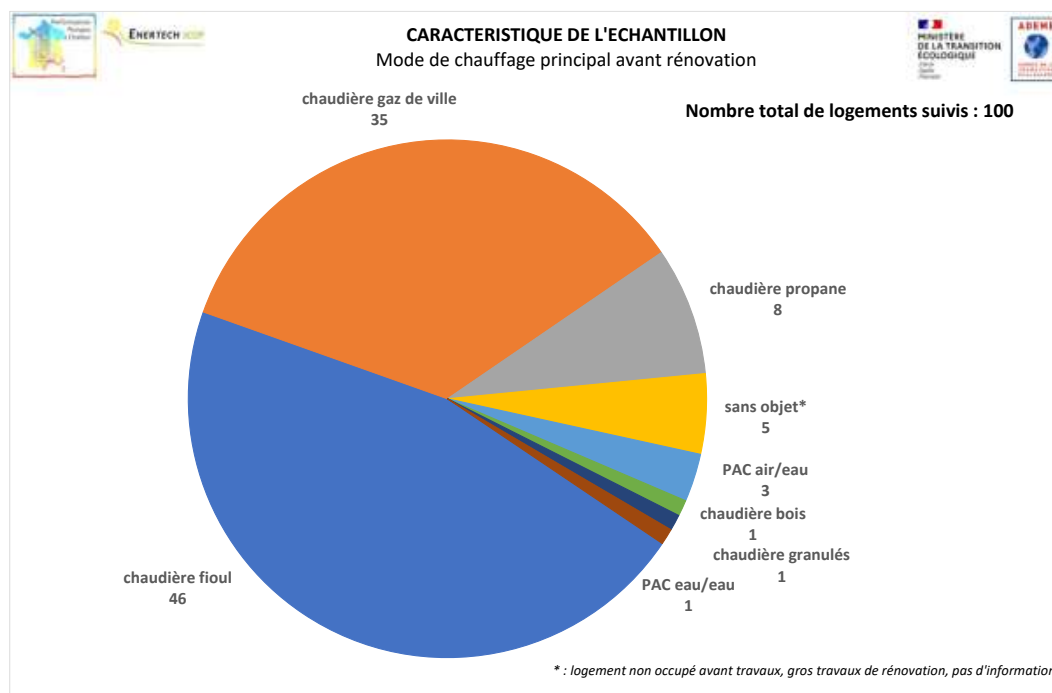


Figure 53 : Mode de chauffage principal avant installation des PAC de l'échantillon

3.4.2. Date d'installation des PAC

L'échantillon est constitué de PAC installées très récemment. En effet, **95% ont été posées il y a moins de 3 ans (2022-2023)** et même 37% au cours de la dernière année (2023). Les deux PAC les plus anciennes, posées en 2019, sont des modèles eau/eau qui n'ont pas été recrutées grâce au fichier CEE fourni par le Ministère.

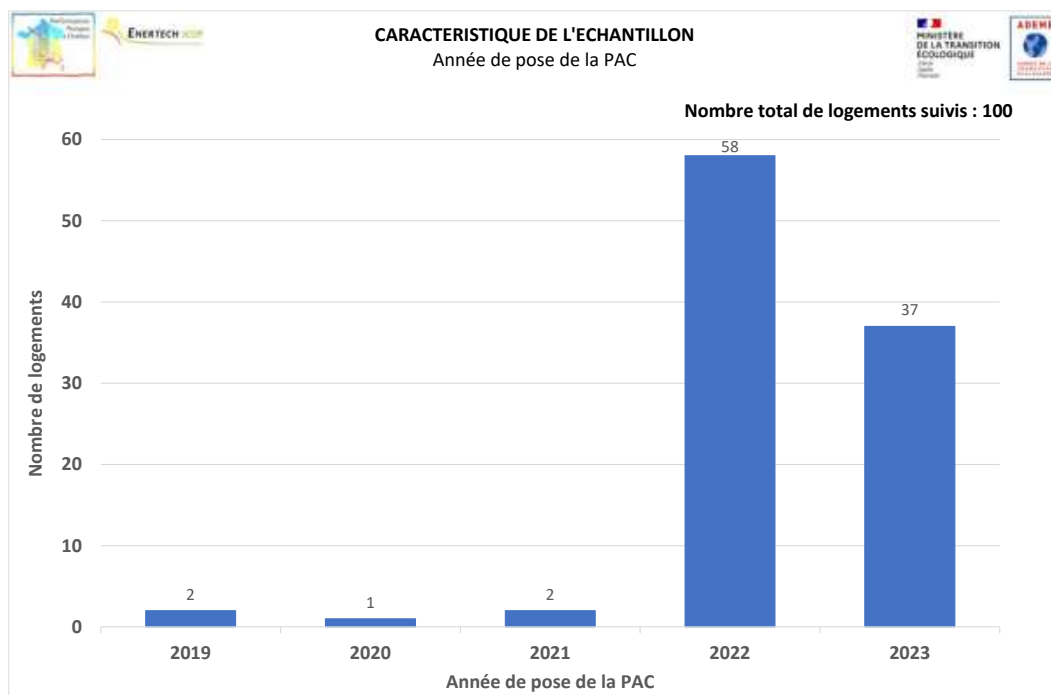


Figure 54 : Année de pose des PAC de l'échantillon

3.4.3. Puissance des PAC et dimensionnement

Choix de la puissance

Le dimensionnement est quasiment toujours réalisé par l'entreprise qui a installé la PAC, parfois à l'aide d'un logiciel fourni par le fabricant. Dans un cas seulement (PAC eau/eau), le propriétaire a fait appel à un bureau d'études. Enfin, 4 propriétaires, travaillant en bureau d'études thermiques, ont effectué eux-mêmes ce dimensionnement (PAC eau/eau dans 3 cas).

Echantillon : les puissances renseignées par les fabricants

Afin d'évaluer l'adéquation entre le dimensionnement des machines et la déperdition des logements, des informations sur la puissance thermique délivrée par les PAC ont été demandées aux fabricants, ou relevées dans leurs documentations techniques détaillées.

Le dimensionnement d'une PAC est dépendant de la localisation du logement, puisque le besoin de puissance de chauffage est calculé à une température extérieure de base qui est influencée par la zone climatique et l'altitude notamment. Le fonctionnement d'une PAC air/eau est aussi très influencé par les conditions climatiques locales, puisqu'il s'agit de la source où l'énergie est puisée. Afin de tenir compte du caractère « local » du dimensionnement et des points de fonctionnement des PAC air/eau, des **puissances thermiques à la température extérieure de base** (déterminée selon le tableau de la norme NF EN 12831) ont été recensées. Ce besoin de caractérisation a représenté une difficulté supplémentaire puisque les fabricants ne communiquent pas nécessairement les caractéristiques techniques de leurs PAC air/eau à tous les points de fonctionnement. Certains ont même eu des difficultés à trouver ces informations en interne.

Afin de couvrir différentes conditions de fonctionnement au niveau de la production, ces informations de puissance ont été recherchées à une température de **sortie PAC de 35°C, 45°C et 55°C**, représentatives des plages de fonctionnement des PAC sur une grande partie de la saison de chauffe.

Afin de pouvoir comparer d'un point de vue macroscopique les puissances des PAC air/eau de l'échantillon entre elles, **des points de fonctionnement plus « classiques » ont été demandés, notamment -7/35°C et -7/55°C**. Le -7°C à l'extérieur est la condition la plus rugueuse présentée classiquement par les fabricants, les 35°C et 55°C représentent respectivement des conditions de production à *basse température* et *moyenne température* d'après les normes régissant les conditions de test de la performance des PAC.

Pour les PAC eau/eau, les échanges avec les fabricants et la lecture des documentations techniques nous ont conduits à retenir le point de fonctionnement à 0°C côté primaire comme étant le plus représentatif du fonctionnement de la PAC dans les conditions les plus froides.

Les graphiques suivants les puissances recensées.

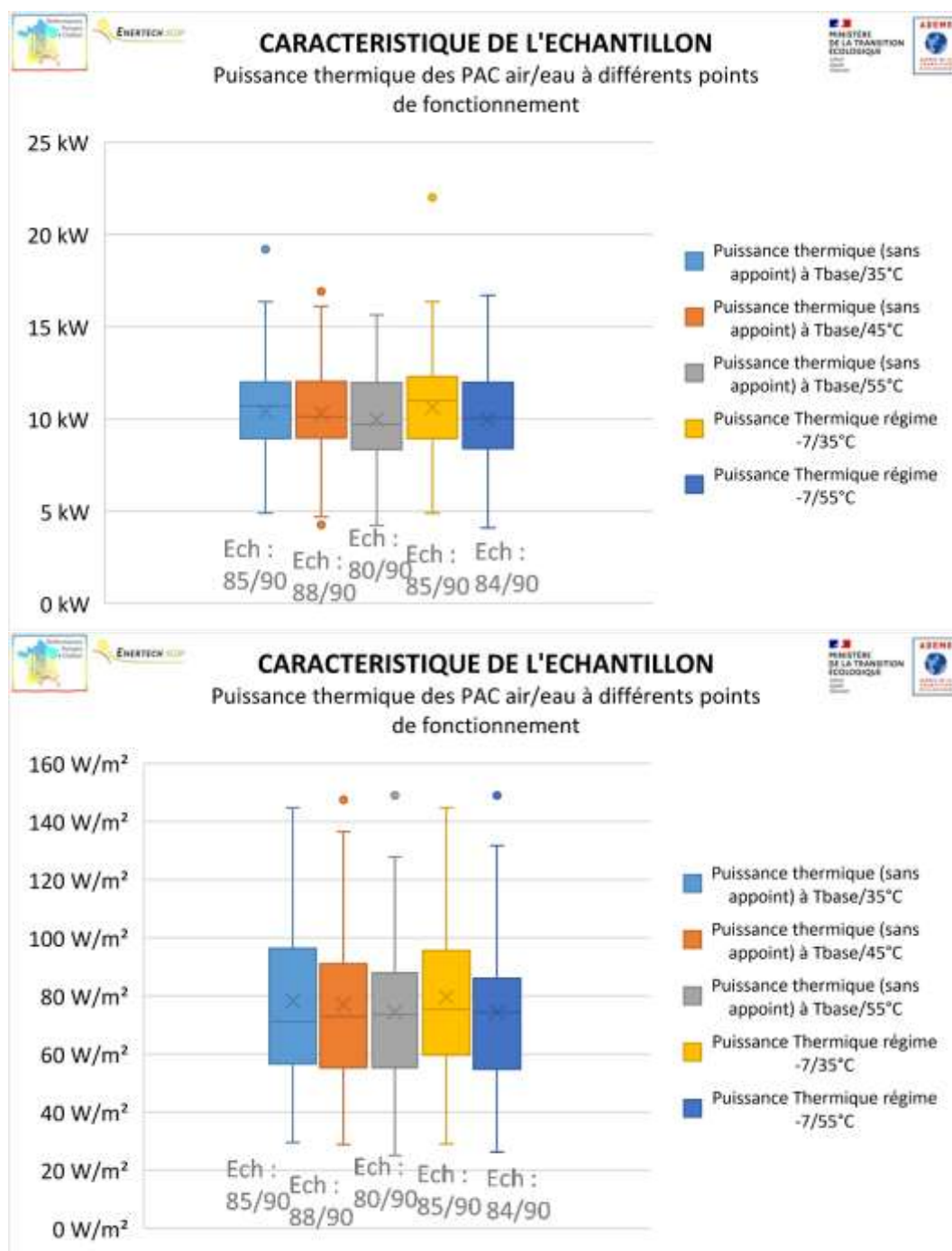


Figure 55 : Puissance thermique des PAC air/eau de l'échantillon à différents points de fonctionnement en kW et en W/m^2

Le graphique de la Figure 55 montre la grande diversité des puissances rencontrées dans notre échantillon. Des puissances calorifiques assez basses, aux alentours de 5 kW, ont été rencontrées sur des logements ayant fait l'objet d'une rénovation globale performante, au même titre que des puissances flirtant avec les 20 kW. Il est raisonnable de retenir que la majeure partie des puissances rencontrées se situe entre 8,5 kW et 12 kW.

Les puissances thermiques ramenées à la surface habitable sont aussi très étendues, de $30 W/m^2_{SHAB}$ à $140 W/m^2_{SHAB}$.

La majeure partie des puissances surfaciques se situe entre $60 W/m^2_{SHAB}$ et $90 W/m^2_{SHAB}$. L'adéquation avec le calcul de la déperdition de chaque logement est vue plus loin.

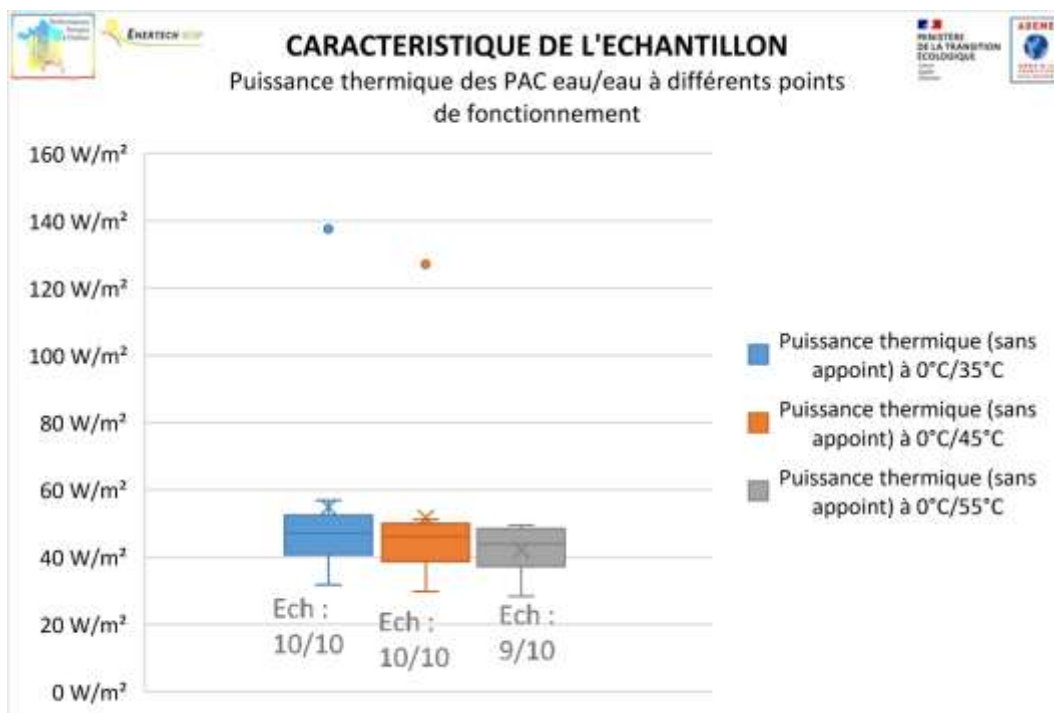
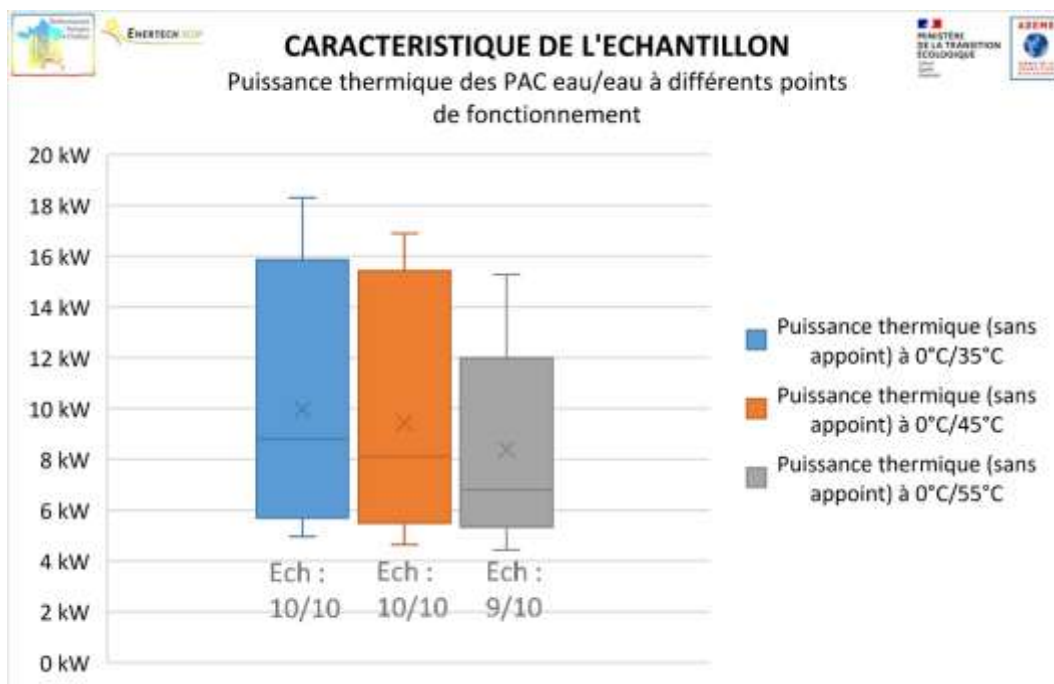


Figure 56 : Puissance thermique des PAC eau/eau de l'échantillon à différents points de fonctionnement en kW et W/m²

Les puissances thermiques des PAC eau/eau de notre échantillon sont légèrement moins dispersées que celles des PAC air/eau, notamment sur les puissances surfaciques (40-50 W/m²). Toutefois devant le faible nombre de PAC composant cet échantillon, il est délicat d'en tirer un enseignement général.

Lien avec la déperdition des logements

Afin d'évaluer la cohérence des puissances des PAC installées avec les déperditions des logements, nous avons analysé le rapport entre la puissance thermique des PAC à Tbase (pour les air/eau) ou 0°C (pour les eau/eau) et la puissance déperditrice évaluée par les audits. Ce rapport indique le facteur de dimensionnement : plus il est élevé plus la PAC est puissante par rapport au besoin. Inversement plus le rapport est faible plus la PAC est sous-dimensionnée.

Plusieurs sources documentent aujourd'hui le dimensionnement des PAC. Dans les règles de dimensionnement de l'AFPAC¹⁸, il est préconisé de dimensionner la puissance de la PAC (hors appoint) entre 60% et 80% de la déperdition à température de base pour une PAC air/eau, et entre 80% et 120% pour une PAC eau/eau.

Le DTU 65.16 recommande de dimensionner la puissance de la PAC entre 80% et 100% de la déperdition à température de base pour une PAC air/eau, et entre 80% et 120% pour une PAC eau/eau.

Comme évoqué précédemment la puissance d'une PAC dépend de la température extérieure et de sa température de production. Dans la comparaison menée ici, la puissance des PAC a été choisie de la manière suivante :

- $T_{ext}=T_{base}$ pour les PAC air/eau et $T_{sol}=0^{\circ}\text{C}$ pour les PAC eau/eau ;
- $T_{prod} = 35^{\circ}\text{C}$ quand le logement ne dispose que d'émetteurs de type planchers-chauffant ;
- $T_{prod} = 55^{\circ}\text{C}$ pour les autres cas. En cas d'absence de la donnée « puissance à 55°C », nous avons pris la valeur de puissance à $T_{prod} = 45^{\circ}\text{C}$ (6 cas sur l'échantillon).

Les résultats sont présentés en page suivante (Figure 57 et Figure 58).

Nous observons un facteur de dimensionnement moyen de 0,96, ce qui signifie que la puissance thermique de la PAC est équivalente à la puissance déperditrice à 4% près. La médiane se trouve à 0,90. On est donc *en moyenne* dans des ratios relativement proches du besoin.

La dispersion des cas est toutefois très marquée, allant de 18-46% pour les 5 PACs les plus faiblement dimensionnées à 165-286% pour les 5 PAC les plus fortement dimensionnées.

Le Tableau 15 ci-dessous résume le nombre de cas sous et surdimensionnés par rapport aux règles de l'art.

PAC air/eau – comparaison aux préconisations DTU 65.16	Sous- dimensionnement $P_{PAC} \leq 80\% P_{DEPERD}$	Dimensionnement attendu $80\% P_{DEPERD} \leq P_{PAC} \leq 100\% P_{DEPERD}$	Sur- dimensionnement $100\% P_{DEPERD} \leq P_{PAC}$
	39 cas 44%	16 cas 18%	34 cas 38%
PAC air/eau – comparaison aux préconisations AFPAC	Sous- dimensionnement $P_{PAC} \leq 60\% P_{DEPERD}$	Dimensionnement attendu $60\% P_{DEPERD} \leq P_{PAC} \leq 80\% P_{DEPERD}$	Sur- dimensionnement $80\% P_{DEPERD} \leq P_{PAC}$
	11 cas 12%	28 cas 32%	50 cas 56%
PAC eau/eau	Sous- dimensionnement $P_{PAC} \leq 80\% P_{DEPERD}$	Dimensionnement attendu $80\% P_{DEPERD} \leq P_{PAC} \leq 120\% P_{DEPERD}$	Sur- dimensionnement $120\% P_{DEPERD} \leq P_{PAC}$
	2 cas 20%	6 cas 60%	2 cas 20%

Tableau 15 : Résultat de l'étude sur le dimensionnement des PAC de l'échantillon par rapport à la déperdition des logements

Si l'on restreint l'analyse aux PAC air/eau, majoritaires dans cet échantillon, la tendance observée est différente si l'on se réfère aux préconisations du DTU ou celles de l'AFPAC.

En comparant notre échantillon aux préconisations du DTU, seuls 18% des cas se situent dans la fourchette de dimensionnement attendue. La tendance observée est plutôt au sous-dimensionnement. Dans ces cas, le sous-dimensionnement est de 0,63 (pour 0,9 préconisé si on se place en milieu de fourchette).

En considérant les préconisations de l'AFPAC, nous observons une tendance au surdimensionnement avec plus d'un cas sur deux. Dans ces cas le surdimensionnement moyen est de 1,22 (pour 0,7 préconisé si on se place en milieu de fourchette).

Dans les deux cas, on n'observe pas de lien particulier avec le fait d'être simple ou double service. Le surdimensionnement atteint un facteur de presque 3 pour le logement 48.

Le surdimensionnement des PAC eau/eau semble plus limité mais ceci est principalement lié à la préconisation de dimensionnement plus élevée pour ces PAC. En effet le facteur moyen de dimensionnement des 10 PAC eau/eau est proche de celui des air/eau avec 1,04.

NB : les puissances des appoints ne sont pas prises en compte ici. D'une part la récupération de leur valeur précise n'a pas été possible dans certains cas, d'autre part le dimensionnement d'une PAC est fait sans appoint et en dessous de la puissance déperditive de manière à limiter les cyclages en bord de saison de chauffe. Ce dernier sujet nous apparaît prioritaire.

Il sera intéressant d'étudier le lien entre le nombre de cycles mesurés et le facteur de surdimensionnement calculé. Ce lien nous permettra notamment de quantifier la potentielle dégradation de performance d'une PAC dans un logement qui réalise une rénovation énergétique *postérieure* à son installation.

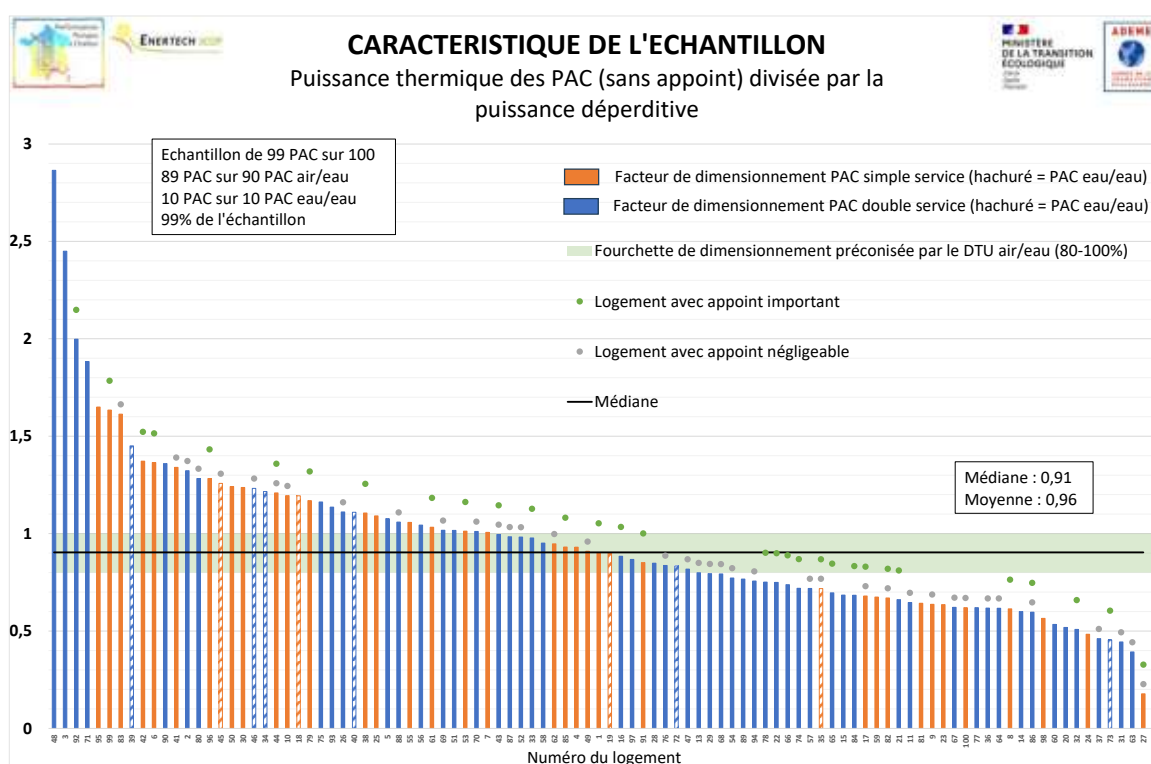


Figure 57 : Facteur de dimensionnement des pompes à chaleur de l'échantillon (rapport entre la puissance de la PAC installée et la déperdition relevée sur le logement)

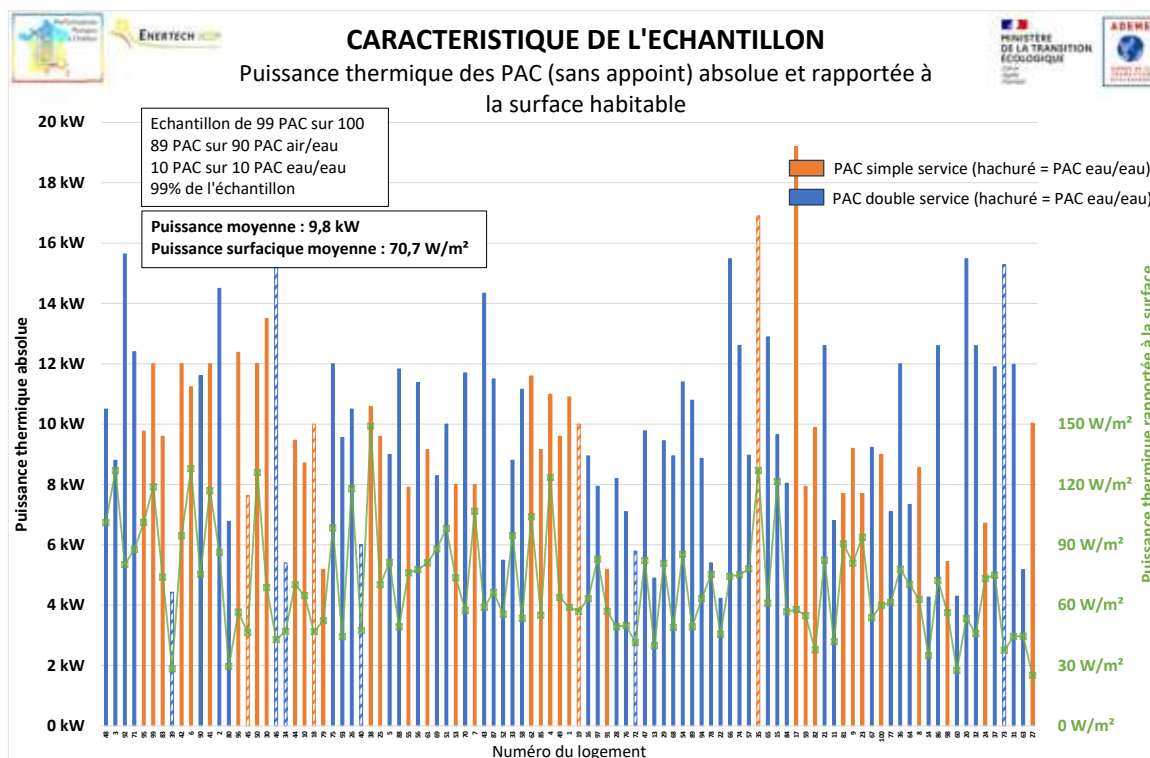


Figure 58 : Puissance thermique des PAC de l'échantillon, absolue et rapportée à la surface habitable. NB : l'ordre des logements est le même que sur le graphique précédent pour pouvoir faire le lien avec le facteur de dimensionnement.

Simple ou double service

Le choix d'opter pour une PAC double service ou de produire séparément l'eau chaude sanitaire est souvent le fruit d'une discussion entre l'installateur et le propriétaire, mais dans certains cas il s'agit d'une demande du propriétaire. Des arguments très différents ont été avancés par les participants pour justifier leur choix (tout le monde n'ayant pas répondu à cette question) :

PAC double service	ECS non produite par la PAC
Installation similaire à la précédente – chaudière double service- (17 personnes)	Installation similaire à la précédente – la chaudière ne faisait que le chauffage- (1) Volonté de conserver le chauffe-eau thermodynamique ou le cumulus déjà en place (7)
	Sécurité - Découpler les systèmes pour ne pas se retrouver sans eau chaude si la PAC tombe en panne (4)
PAC plus performante que l'ancien cumulus pour faire de l'ECS (3)	PAC double service pas performante pour faire de l'eau chaude sanitaire -haute température- (2)
	Peur que la PAC ne soit pas assez puissante pour faire l'ECS (2) PAC double service plus chère (2) Pas la place d'installer la PAC double service (1) Maximiser les aides (1)

La première raison invoquée est la conservation des systèmes existants et/ou la reproduction du schéma de production en place avant l'installation de la PAC. Vient ensuite la volonté, pour des raisons de sécurité, de dissocier la production de chauffage et d'eau chaude. Le troisième argument porte sur l'efficacité énergétique de la production d'ECS. De façon étonnante, les avis divergent. Ainsi, certaines

personnes ont opté pour une PAC double service car ils estiment que c'est un moyen performant pour produire l'eau chaude sanitaire. Dans le même temps, les partisans de la séparation des systèmes estiment qu'une PAC n'est pas un moyen efficace de produire de l'eau chaude à haute température. Ce projet sera l'occasion d'objectiver ces positions.

Enfin, de façon isolée, d'autres raisons sont mises en avant : coût plus élevé d'une PAC double service, peur que la PAC choisie ne soit pas assez puissante pour produire l'ECS, problème de place, volonté de maximiser les aides financières.

3.4.4. Analyse des coûts

Méthodologie :

L'analyse des coûts réalisée ici est basée sur les factures ou devis finaux quand les participants les avaient encore en leur possession ou, si ce n'était pas le cas, sur des informations « déclaratives ».

Nous avons tenté de recueillir toute information concernant le coût des travaux liés à la pompe à chaleur, ainsi que les aides desquelles les participants ont bénéficié.

L'ensemble des coûts est présenté en € TTC.

Coût des travaux liés à la pompe à chaleur :

Nous analysons dans cette partie le coût de l'ensemble des travaux liés à la pompe à chaleur. Ce coût comprend la fourniture du matériel et la main d'œuvre pour l'installation de la PAC, la dépose de l'ancienne chaudière, ainsi que pour l'ensemble des organes annexes comme les ballons tampons, disconnecteurs, vannes, pots à boue, etc. Il s'agit donc bien du coût total de l'opération. Le coût lié à la PAC a été isolé des autres travaux quand plusieurs actions ont été menées en même temps dans le logement (chauffe-eau, isolation, radiateurs, planchers-chauffant), ce qui rend délicat dans ces cas l'analyse des aides puisqu'il devient complexe de les affecter précisément.

Le coût moyen des travaux s'élève à 15 287 €TTC (simple service : 13 064 €TTC, double service 16 531 €TTC) avec une variabilité importante (minimum 10 000 €, maximum 25 914 €).

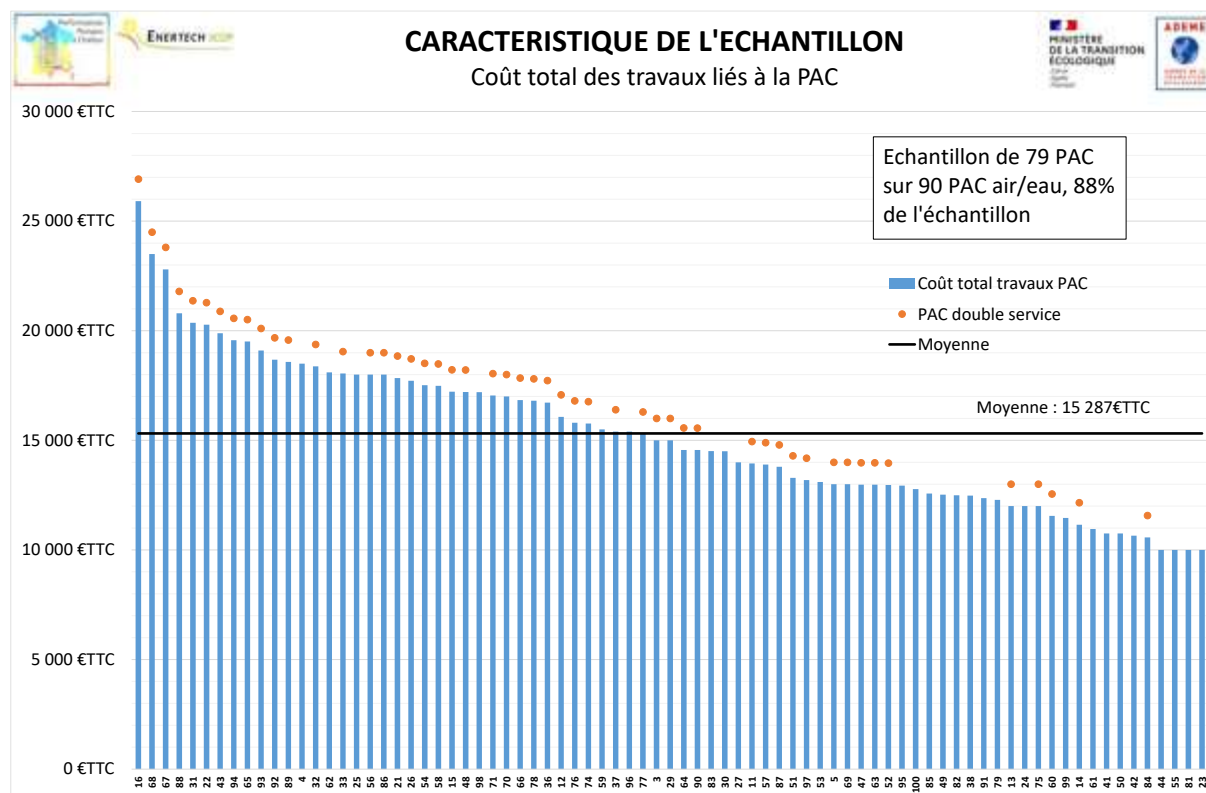


Figure 59 : Coût total des travaux liés à l'installation des PAC air/eau de l'échantillon

Etant donné que pour les PAC eau/eau il faut recueillir aussi le cout du forage/des VRD en plus de la PAC, nous n'avons pu recueillir complètement les informations de coûts que sur 4 PAC eau/eau sur les 10, présentées dans le

Logement	Type de PAC eau/eau	Coût total PAC (€TTC)	Coût forage (€TTC)	Montant aides (€TTC)
34	eau/eau sonde verticale 120m	36162	11562	14000
39	eau/eau (verticale 105 m)	20284	11000	0
45	eau/eau sonde verticale 150m	23931	10286	5000
46	eau/eau sonde verticale 3 forages de 137, 137 et 150m	51055	29688	3000

Tableau 16.

Logement	Type de PAC eau/eau	Coût total PAC (€TTC)	Coût forage (€TTC)	Montant aides (€TTC)
34	eau/eau sonde verticale 120m	36162	11562	14000
39	eau/eau (verticale 105 m)	20284	11000	0
45	eau/eau sonde verticale 150m	23931	10286	5000
46	eau/eau sonde verticale 3 forages de 137, 137 et 150m	51055	29688	3000

Tableau 16 : Détail des coûts pour 4 PAC eau/eau.

Reste à charge :

Nous analysons ici le reste à charge pour les ménages, calculé en soustrayant les aides au coût des travaux, dans les cas où l'information a pu être recueillie.

Le reste à charge moyen s'élève à 9 961 €TTC (simple service : 6 433 €TTC, double service 11 872 €TTC). Deux logements de l'échantillon ont un reste à charge nul, alors que 10 d'entre eux ont un reste à charge supérieur à 15 000 €.

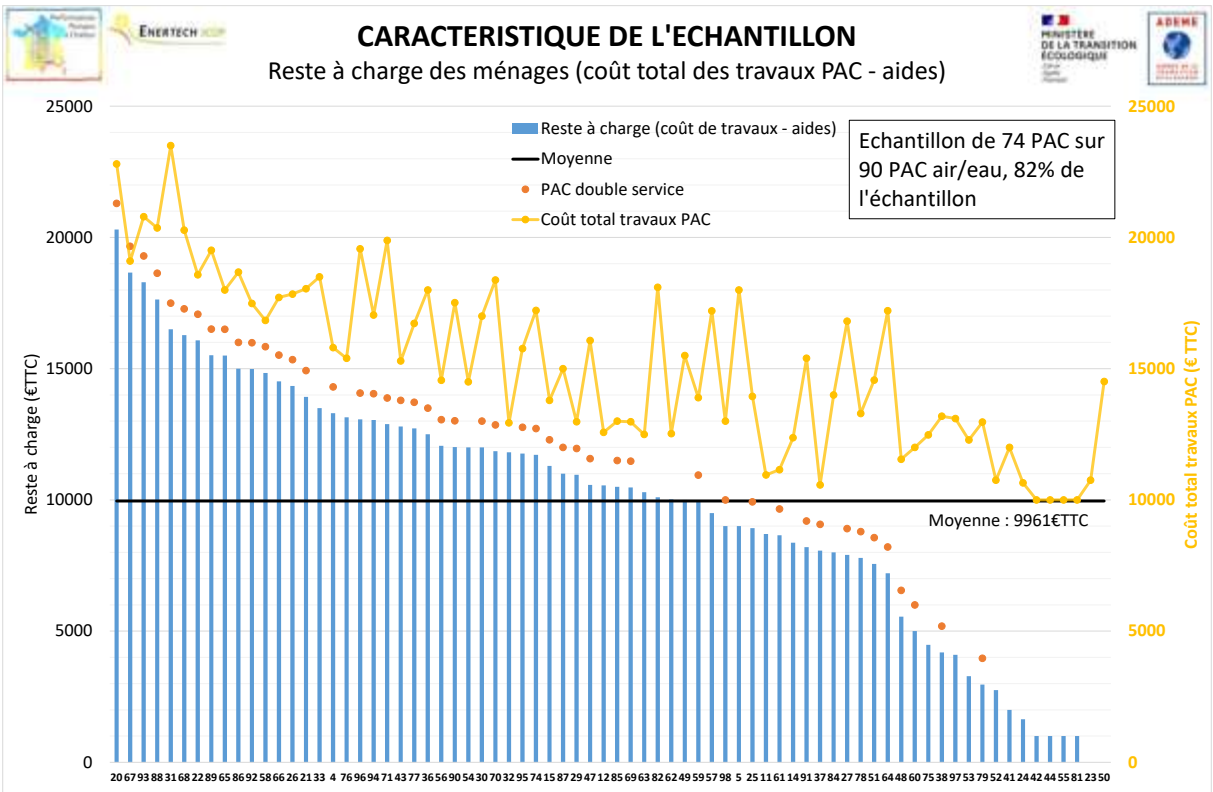


Figure 60 : Reste à charge des ménages dans l'installation de leur PAC air/eau

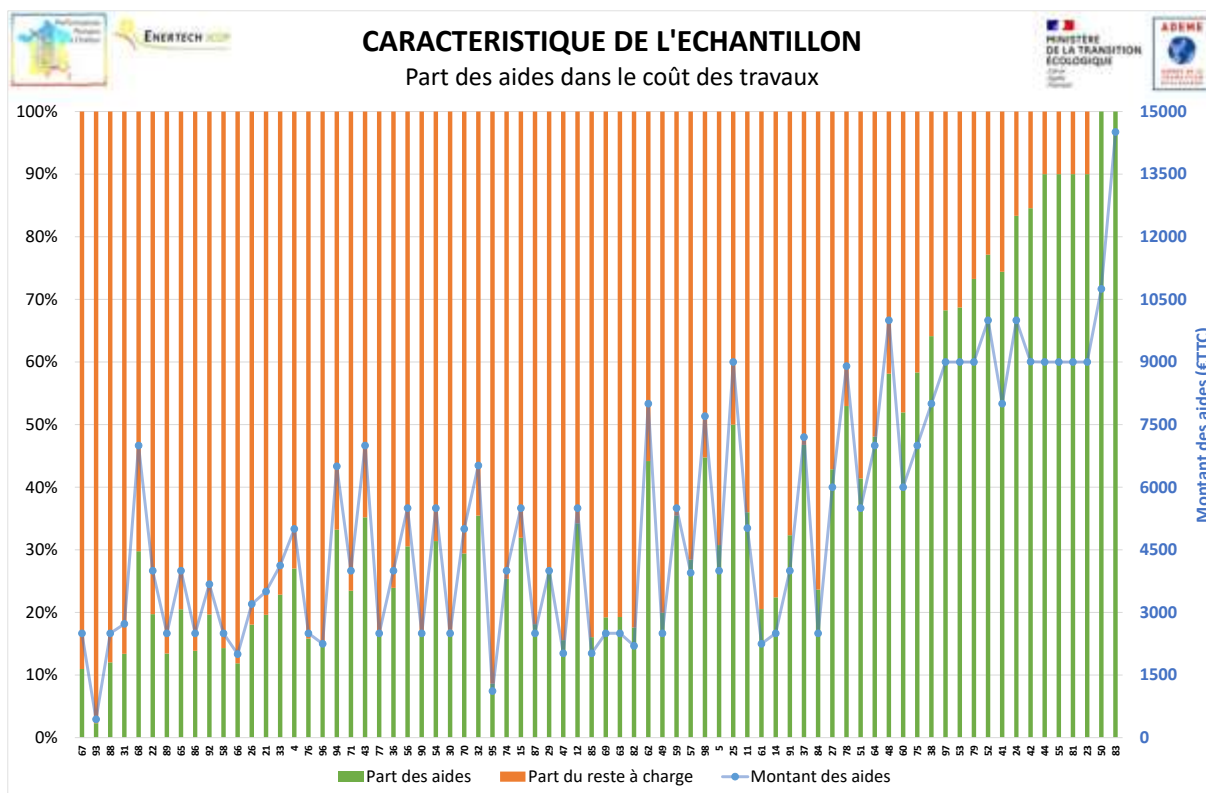


Figure 61 : Part des aides dans le coût des travaux (même ordre de logements que le graphique précédent)

Le graphique de la Figure 61, dont les logements sont organisés dans le même ordre que dans le graphique précédent, permet d'apprécier la part et le montant des aides dans différents logements de l'échantillon. **La part des aides dans le financement des travaux s'élève en moyenne à 37%, soit plus du tiers du coût total** (simple service : 54%, double service : 29%).

Nous présentons dans les graphiques suivants la répartition des aides pour les logements où l'information était disponible. Dans le cas où les occupants n'avaient pas les papiers justificatifs des aides reçues, ils nous ont indiqué – de tête en général - celle(s) dont ils ont bénéficié. Dans de nombreux cas l'occupant n'a pas su fournir précisément la source de l'aide, ce qui explique le taux important d'aides d'origine indéterminée.

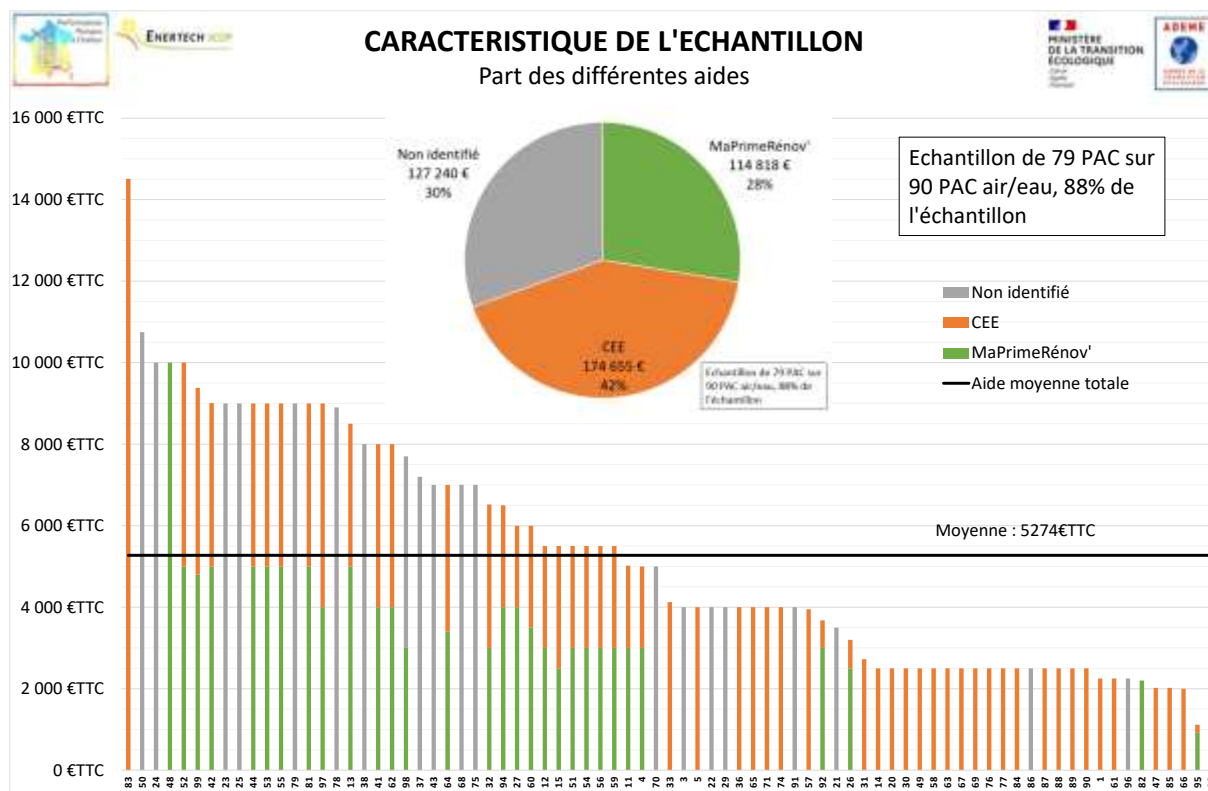


Figure 62 : Origine des aides perçues sur l'installation des PAC air/eau

Part de la main d'œuvre dans le coût des travaux :

Il est très délicat de tirer des enseignements robustes sur la décomposition des prix des travaux d'installation des PAC. En effet, la structuration des devis/factures est très variable. Certains devis possèdent parfois une seule ligne pour l'ensemble de l'opération, d'autres détaillent très précisément l'ensemble des éléments. De plus, il arrive que le coût lié à la main d'œuvre apparaisse parfois sur une ligne bien distincte, ou qu'à l'inverse il soit compris dans chaque ligne du devis. Dans le cas où une ligne bien définie est dédiée à la main d'œuvre, rien n'assure qu'une part de main d'œuvre ne soit pas intégrée aussi dans les prix identifiés comme fournitures...

Dans la même idée, le coût de dépose de la chaudière ancienne n'apparaît pas toujours sur les devis, il arrive que la prestation soit offerte, ou parfois omise. La dépose de la chaudière apparaît parfois en tant que telle avec un prix dédié, mais est souvent comprise dans le prix de la PAC ou dans la main d'œuvre liée à sa pose.

Devant cette diversité, nous avons essayé malgré tout, lorsque les éléments à disposition le permettaient, de séparer les coûts en 3 catégories :

- Coût de dépose de la chaudière existante.
- Coût de la main d'œuvre, comprenant aussi la mise en service.
- Coût de la fourniture du matériel (PAC et accessoires).

A noter que dans de nombreux cas le coût de dépose de la chaudière est assez opaque, parfois compris dans le coût de la main d'œuvre ou de la fourniture de la PAC. Au regard des montants associés à cette prestation lorsqu'ils sont connus, nous pouvons négliger cette imprécision.

La variabilité de structuration des devis rend ces décompositions de coûts assez imprécises. Elles permettent toutefois de donner des ordres de grandeurs intéressants (Figure 63).

Sur cet échantillon plus modeste, **le coût moyen de la main d'œuvre s'élève à 2 324 €TTC** (simple service : 2 198 €TTC, double service 2 384 €TTC). La part de la main d'œuvre dans le coût total des travaux liés à la PAC vaut 15,5% en moyenne (simple service : 17,9%, double service : 14,4%).

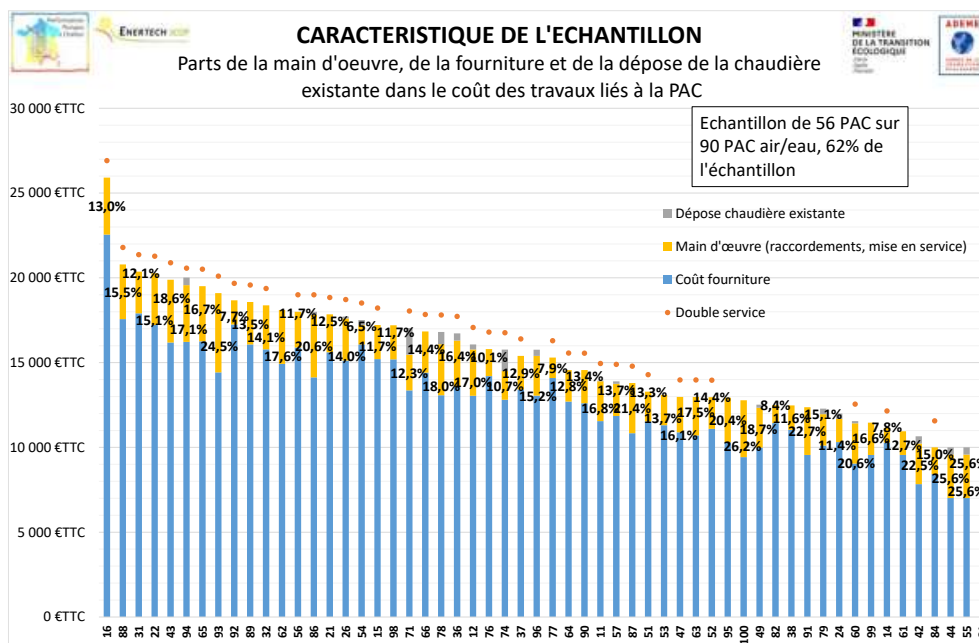


Figure 63 : Parts de la main d'œuvre, de la fourniture et de la dépose de la chaudière existante dans le coût des travaux d'installation des PAC air/eau

L'analyse des coûts affichés pour les PAC montre une grande variabilité du prix pour ces équipements, **avec une moyenne s'élevant à 10 659 €TTC** (simple service : 8 780 €TTC, double service : 11 628 €TTC). Les PAC double service sont généralement plus chers que les PAC simple service, bien que les 2 PAC avec les coûts les plus faibles soient des modèles double service. Encore une fois, la répartition de la marge des installateurs sur les éléments de devis explique probablement une partie des écarts observés.

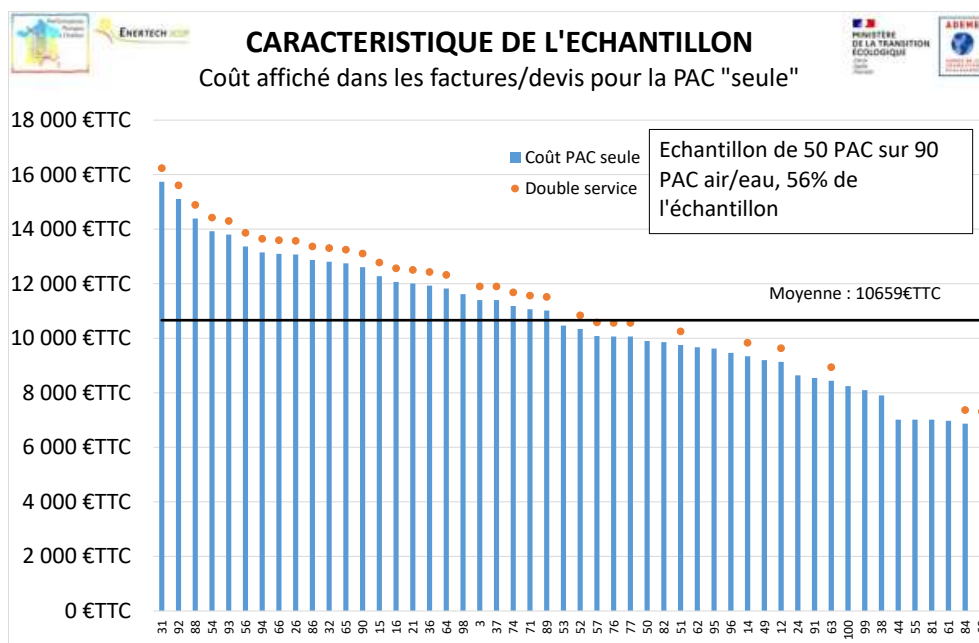


Figure 64 : Coût affiché dans les factures/devis pour la fourniture des PAC air/eau

3.4.5. Usage par l'occupant

Seules 15 PAC ne sont pas pilotées par un thermostat parmi lesquelles :

- 2 sont des planchers chauffants régulés uniquement en fonction de la température extérieure.
- 13 sont équipées de radiateurs régulés individuellement par des robinets thermostatiques (tous - 6 logements - ou seulement une partie d'entre eux - 7 logements également -).

Mais, sur ces 15 cas :

- 4 participants sont en attente de la pose d'un thermostat (long délai de livraison de ce composant)
- 1 a dû l'enlever car il perturbait le fonctionnement de la PAC
- 1 ne peut pas en installer car c'est incompatible avec le pilotage par l'application.

A noter qu'un petit nombre de thermostats sont installés dans des endroits a priori peu opportuns (chambres ou garage).

Dans les logements équipés de thermostat :

- 60% des participants les utilisent dont au moins les 2/3 pour modifier la température de consigne, 21% pour régler un ralenti de nuit, 13% pour faire une programmation horaire (réduit en période d'absence) et 4% pour arrêter la PAC lorsqu'il n'y a pas de besoin. *NB : tous les participants n'ont pas précisé l'usage qu'ils font du thermostat.*
- 34% déclarent ne pas y toucher (réglage initial de l'installateur)
- Dans 6% des cas, la réponse n'est pas claire.

Dans près des trois quarts des logements équipés de PAC double service, la température de l'eau chaude sanitaire a été réglée initialement à l'installation par le chauffagiste et n'a pas été modifiée depuis.

3.4.6. Maintenance des installations

Depuis 2020, le contrôle et la maintenance des PAC de puissance comprise entre 4 et 70 kW est obligatoire (décret n° 2020-912 du 28 juillet 2020). Il est stipulé que cet entretien doit être réalisé, selon les réglementations en vigueur, « par une personne remplissant les conditions de qualification professionnelle » propres à cette mission. La période entre deux contrôles ne doit pas dépasser deux ans. Cependant, la réglementation ne prévoit pas de sanction en l'absence d'entretien annuel (aucune amende n'est applicable) mais un assureur peut refuser d'indemniser en cas de sinistre.

A ce jour :

- **Seuls 38% des participants ont souscrit un contrat de maintenance annuel**, le plus souvent auprès de l'entreprise qui a posé la PAC.
- Les installations étant récentes (cf. paragraphe 3.4.2), 15% n'en ont pas encore contracté mais prévoient de le faire.
- 12% estiment qu'ils n'en ont pas besoin et qu'ils planifieront plutôt des visites régulières de révision.
- 35% ne prévoient pas de souscrire ce type de contrat.

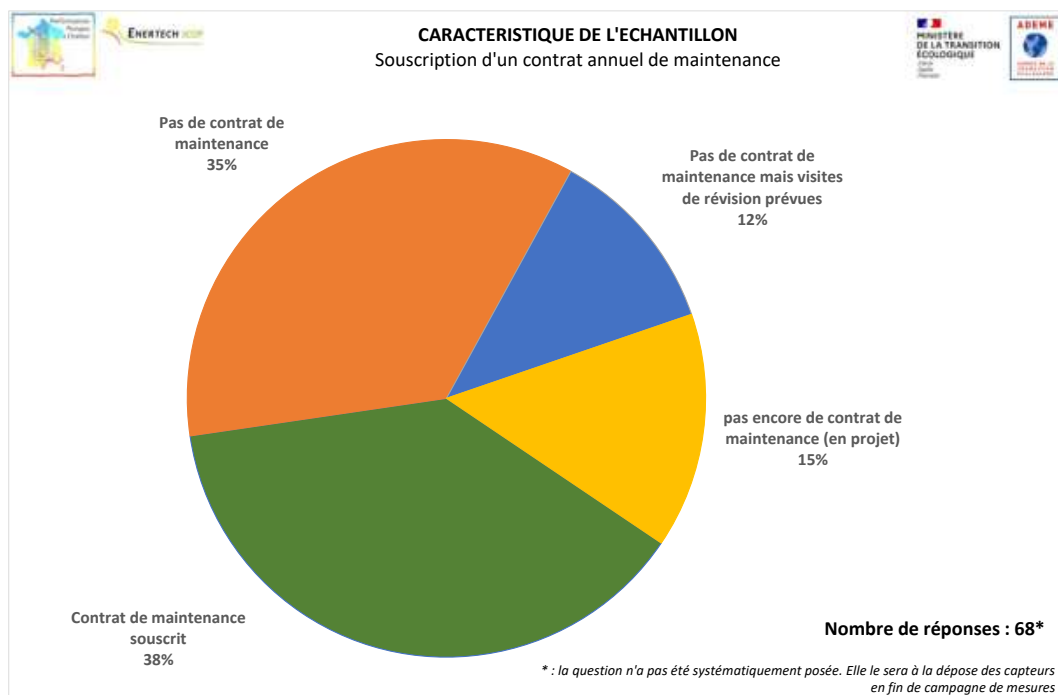


Figure 65 : Etat des lieux des souscriptions d'un contrat de maintenance annuel par les participants

3.4.7. Satisfaction de l'occupant

Satisfaction relative aux travaux d'installation.

Une grande majorité (88%) des participants sont satisfaits de la manière dont se sont déroulés les travaux d'installation de leur PAC.

Les raisons invoquées par les foyers moyennement ou pas satisfaits sont les suivantes (12%) :

Chantier

- Durée trop longue des travaux.
- Trop grand délai d'obtention de certains composants (notamment les thermostats).
- Faillite de l'entreprise en cours de chantier.
- Difficultés de communication entre le fabricant et l'installateur.
- Schéma de principe de l'installation complexe qui dégrade ses performances.
- Mise en œuvre peu fonctionnelle et peu esthétique (tuyaux de fluides frigorigènes passant par une fenêtre).
- Chantier mal mené (pas propre, nécessité de reprendre la plomberie).

Réception

- Travaux sous-traités à une équipe étrangère qui n'a pas transmis les informations nécessaires à la réception (sous-traitance à bas coût, prestation « tirée vers la base »).
- Pas d'explication à la réception de l'installation.
- Pas de purge des radiateurs à la réception.

Satisfaction relative au fonctionnement de la PAC

Nous avons également demandé aux participants leur avis sur le fonctionnement de leur PAC :

- **71% sont satisfaits du fonctionnement.**
- 23% sont moyennement ou pas du tout satisfaits.
- 6% ne sont pas en mesure de se prononcer car l'installation est trop récente pour avoir le recul suffisant.

Ainsi 75% des personnes en mesure de se prononcer sont satisfaites du fonctionnement de leur PAC. Sur les 23 cas d'insatisfaction, 5 ne sont « pas du tout satisfaits ».

Les raisons d'insatisfaction sont :

- Radiateurs moins chauds qu'auparavant (5)
- Niveau sonore de l'unité extérieure trop élevé - gêne pour les propriétaires et leurs voisins - (4).
- Mise en défaut fréquente de la PAC (4).
- Problème de communication entre la PAC et le thermostat (4).
- Surconsommation d'énergie / Montant de la facture d'électricité trop élevé (3).
- Fonctionnement (quasi) permanent de l'unité extérieure - courts cycles - (2).
- Dégagement de froid au niveau de l'unité extérieure.
- PAC pas assez puissante.
- Attente plus longue de l'eau chaude sanitaire.
- Sifflement de l'unité extérieure en phase de dégivrage.
- Vibrations de la PAC ressenties dans le logement (unité extérieure fixée sur le mur).
- Sifflements au niveau des radiateurs.
- Mauvais équilibrage ou nettoyage du réseau hydraulique.
- Condensation en période de rafraîchissement.

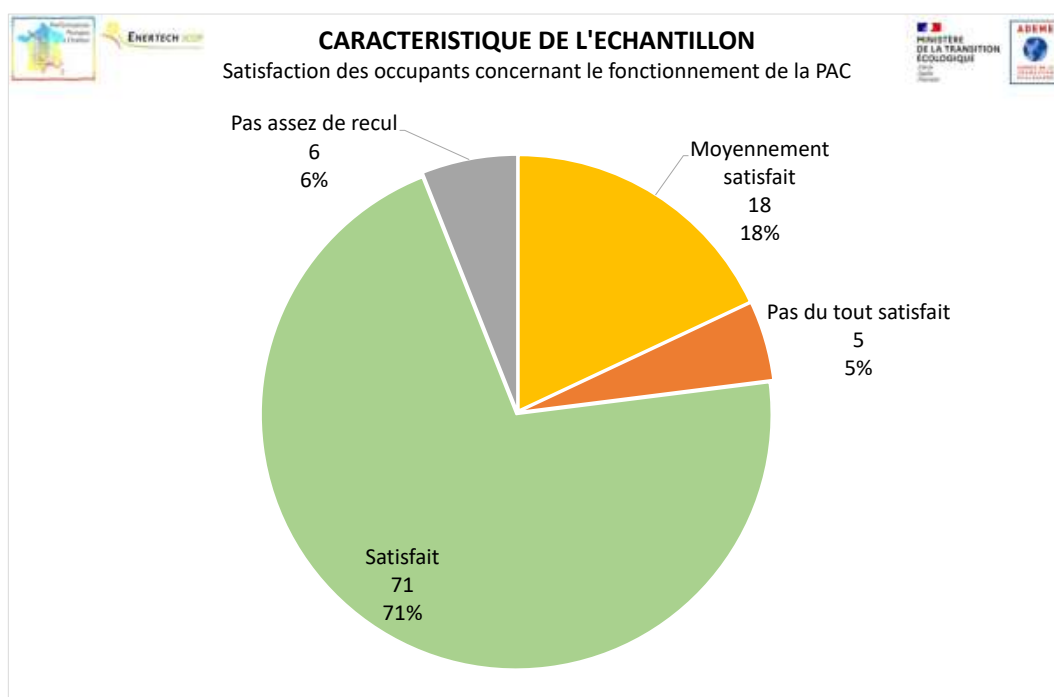


Figure 66 : Satisfaction des occupants de l'échantillon concernant le fonctionnement de leur PAC

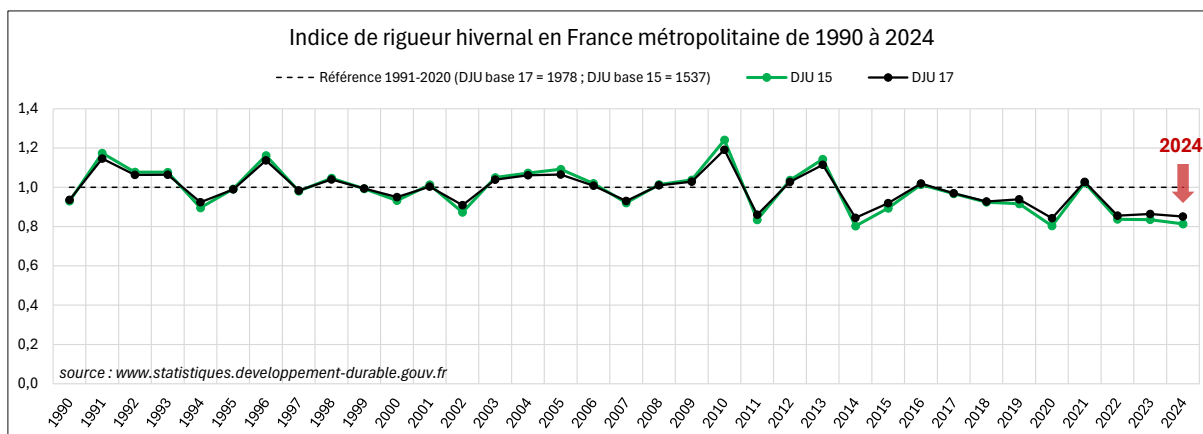


Figure 68 : Indice de rigueur hivernal en France Métropolitaine depuis 1990, en DJU base 15 et DJU base 17

1.3. Illustration de la méthode d'analyse des données employée

1.3.1. Détermination des consommations de chaleur et d'électricité

La campagne de mesure déployée sur cette opération (détaillée au §2.3.4) est remarquable par la quantité de données générées. Chaque voie de mesure à la minute représente au total 525 600 données par an.

L'analyse des données a donc nécessité de mettre en place des routines informatiques pour le nettoyage et le traitement des données. Le programme « générique » de traitement pour l'ensemble des logements a été mis en défaut sur certains cas/logements particuliers, qui ont alors nécessité des routines dédiées. Au total, ce sont plus de 10 000 lignes de code qui ont permis de nettoyer et traiter les données afin d'aboutir aux résultats présentés dans ce rapport.

Nous présentons ci-dessous une journée type de mesure dans un logement pour illustrer la méthode de traitement (le 06/03/2024 dans le logement 054015). Les données « brutes » sont présentées à la Figure 69.

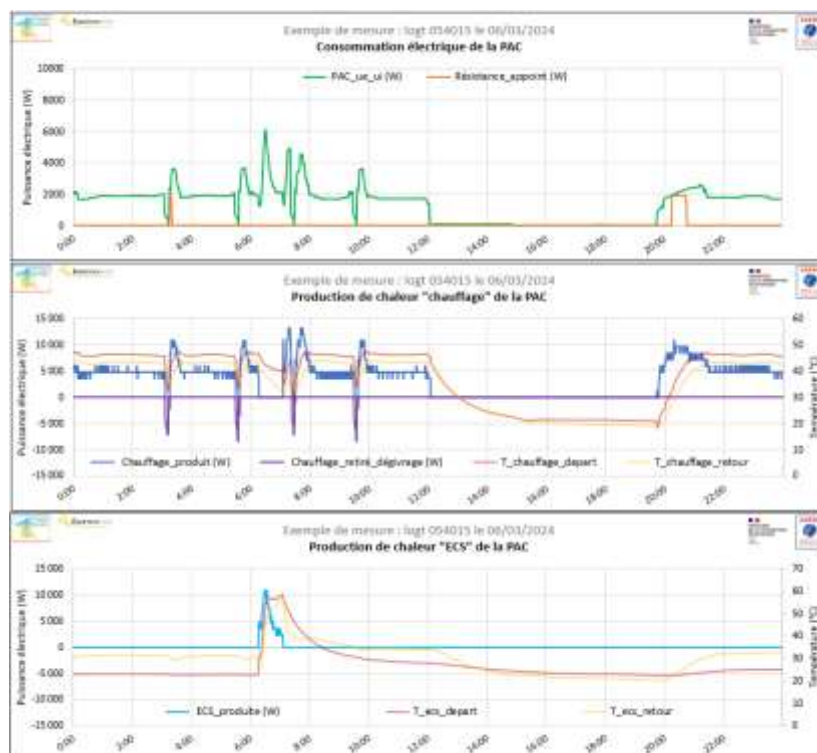


Figure 69 : Données "brutes" du logement 054015 le 06/03/2024 pour illustration de la méthode de traitement. Les résistances d'appoint sont séparées de la consommation électrique de la PAC lors du pré-processing des données.

Sur cette période de mesure, avec les données à la minute, nous observons (voir Figure 70) :

- 4 périodes « D » de dégivrage par inversion de cycle (en violet). Ces périodes sont identifiables par le changement de signe de la différence de température entre le départ et le retour chauffage (le départ devient inférieur au retour), ainsi que du changement de comportement sur la puissance électrique de la PAC. A noter que le dégivrage mesuré sur ce cas a lieu sans allumage de la résistance d'appoint, ce qui n'est pas toujours le cas (selon la régulation interne de la PAC et la température de retour de chauffage vers la PAC).
- 1 période « ECS » de production d'eau chaude sanitaire par la PAC (en bleu ciel), identifiable par le compteur de chaleur associé.
- 8 périodes « CH » de production de chauffage (en bleu marine), mesurées par le compteur de chaleur chauffage (hors période de dégivrage), et la non sollicitation de l'appoint électrique.
- 2 périodes « CH+R » de production de chauffage avec aide de la résistance d'appoint (en orange), caractérisées par un appel de puissance électrique de la résistance d'appoint lors d'une période de production chauffage.
- 1 période « EHP » de consommation électrique sans production de chaleur (en vert), correspondant principalement à la veille de la machine et au fonctionnement des circulateurs (présence d'une consommation électrique sans production de chaleur). Cette période comprend dans le cas présent 2 niveaux de puissance : un premier (élevé, à 97W) correspondant à la veille de l'équipement et au fonctionnement des circulateurs, et un second (plus faible en puissance, 21W) lié à la régulation (veille) de la pompe à chaleur.

La Figure 70 présente ces différentes périodes de mesure.

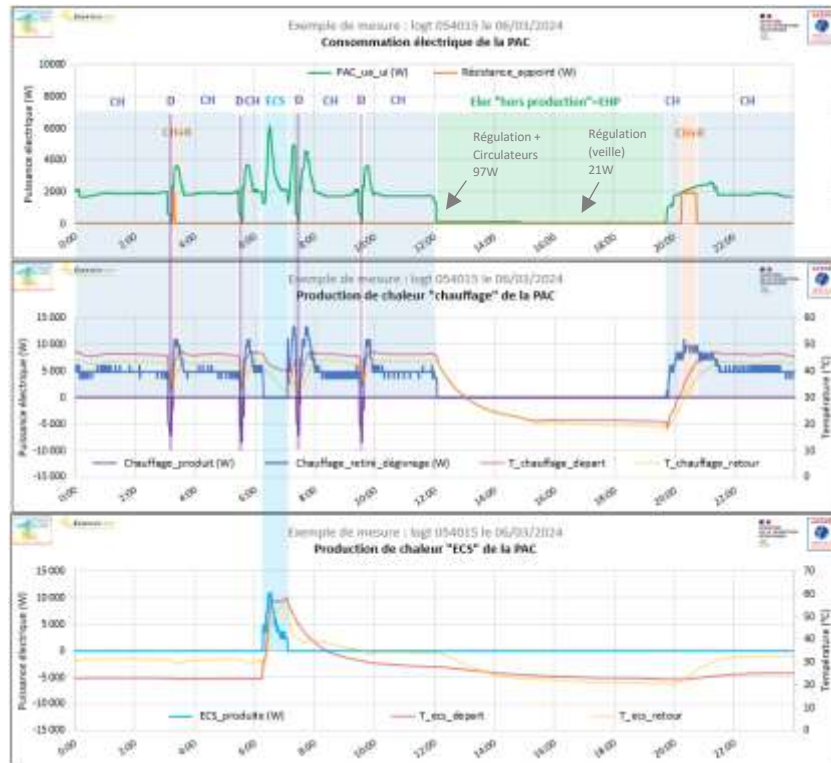


Figure 70 : Identification des différentes périodes mesurées

Sur cette journée, nous calculons les consommations de chaleur et d'électricité de façon suivante :

- La chaleur fournie par l'installation pour le chauffage : $\text{Chaleur}_{\text{fournie_CH}} = \text{Chauffage}_{\text{produit_tot}} + \text{Chauffage}_{\text{retiré dégivrage}}$, le $\text{Chauffage}_{\text{retiré dégivrage}}$ étant négatif.
- L'électricité consommée pour produire le chauffage : $\text{Elec}_{\text{PAC_chtot}} = \text{Elec}_{\text{PAC_CH}} + \text{Elec}_{\text{ResCH}} = \text{PAC}_{\text{ue_ui_ch}} + \text{Résistance_appoint}_{\text{CH+R}}$.
- La chaleur fournie par l'installation pour l'eau chaude sanitaire : $\text{Chaleur}_{\text{fournie_ECS}}$.
- L'électricité consommée pour produire l'ECS : $\text{Elec}_{\text{PAC_ECStot}} = \text{Elec}_{\text{PAC_ECS}} + \text{Elec}_{\text{ResECS}} = \text{PAC}_{\text{ue_ui_ECS}} + \text{Résistance_appoint}_{\text{ECS}}$, dans cet exemple $\text{Résistance_appoint}_{\text{ECS}}$ est nul.
- L'électricité hors production « EHP » est répartie jour par jour au prorata des consommations électriques PAC chauffage et ECS (hors joule) sur chacun des postes : $\text{Elec}_{\text{EHP_CH}} = \text{Elec}_{\text{EHP}} \times \frac{\text{Elec}_{\text{PAC_CH}}}{\text{Elec}_{\text{PAC_CH}} + \text{Elec}_{\text{PAC_ECS}}}$ et $\text{Elec}_{\text{EHP_ECS}} = \text{Elec}_{\text{EHP_TOT}} - \text{Elec}_{\text{EHP_CH}}$.
- L'électricité consommée pour le dégivrage est répartie entre le chauffage et l'eau chaude sanitaire de façon similaire à l'électricité hors production (au prorata des consommations électriques).

1.3.2. Détermination des COP

A partir des grandeurs définies dans la partie précédente, les COP sont déterminés à partir des formules suivantes :

$$\text{COP}_{\text{chauffage}} = \frac{\text{Chaleur}_{\text{fournie_CH}}}{\text{Elec}_{\text{PAC_CH}} + \text{Elec}_{\text{ResCH}} + \text{Elec}_{\text{Dégivrage_CH}} + \text{Elec}_{\text{EHP_CH}}}$$

$$\text{COP}_{\text{ECS}} = \frac{\text{Chaleur}_{\text{fournie_ECS}}}{\text{Elec}_{\text{PAC_ECS}} + \text{Elec}_{\text{ResECS}} + \text{Elec}_{\text{Dégivrage_ECS}} + \text{Elec}_{\text{EHP_ECS}}}$$

Le COP est ainsi le quotient de la chaleur produite par l'électricité consommée par la pompe à chaleur, il indique la quantité de chaleur fournie par la machine pour une unité d'électricité consommée. Il s'agit de l'indicateur phare de la performance de ces équipements : plus le COP est élevé, plus la machine produit de la chaleur efficacement.

A noter, la chaleur fournie pour le dégivrage est bien déduite de la chaleur totale pour calculer les numérateurs des COP. Les consommations d'électricité pour le dégivrage et l'électricité hors production sont réparties sur le chauffage et l'eau chaude sanitaire au prorata journalier des consommations électriques PAC de chacun des postes (hors joule, voir paragraphe précédent).

Les consommations d'électricité et productions de chaleur mesurées, déterminées au pas de temps journalier à partir des algorithmes détaillés au paragraphe 1.3.1, sont sommées sur l'ensemble de l'année pour calculer les coefficients de performance saisonniers pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, selon les formules précédentes. Ces indicateurs, notés « SCOP », reflètent l'efficacité de la machine sur une année pour chacun des postes.

1.3.3. Introduction du COP et du facteur de Carnot

Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique idéal, représentant l'efficacité maximale théoriquement atteignable. Le COP de ce cycle, désigné sous le nom de COP_{CARNOT} , correspond à la limite supérieure du COP qu'un cycle ou une machine réelle peut atteindre en théorie. La formule du COP du cycle de Carnot est la suivante : $COP_{CARNOT} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$ avec T_f la température de la source froide et T_c la température de la source chaude, ces températures étant celles de la boucle thermodynamique. Toutes les machines frigorifiques réelles ont une efficacité inférieure à celle de la machine de Carnot dans les mêmes conditions.

Il est intéressant de rapprocher le COP réel, mesuré, de ce COP_{CARNOT} pour évaluer l'efficacité des pompes à chaleur. Dans le cadre de cette campagne de mesure, nous ne mesurons pas les températures de la source froide et de la source chaude sur la boucle thermodynamique. Nous approximations donc la température de la source chaude T_c par la température de la chaleur produite par la PAC, et la température de la source froide T_f par la température de l'air extérieur (PAC air/eau) ou de l'eau provenant de la source géothermique (eau de nappe, sol, etc. pour les PAC eau/eau). Entre ces valeurs mesurées et les valeurs « réelles » de T_c et T_f du cycle thermodynamique, se trouvent des échangeurs présentant différents pincements qui induisent que notre calcul du COP_{CARNOT} est nécessairement approximatif. Nous persistons à calculer cet indicateur comme tel car celui-ci représente toutefois une bonne mesure de l'efficacité maximale théoriquement atteignable par le cycle de Carnot dans les mêmes conditions aux bornes.

Afin d'évaluer l'efficacité de nos machines frigorifiques réelles par rapport au cycle théorique de Carnot, nous introduisons et calculons un facteur de Carnot f dont voici la formule : $f = \frac{COP_{R\acute{e}el}}{COP_{CARNOT}}$. Plus ce facteur f est faible, moins le fonctionnement de la machine est efficace.

En pratique, pour le chauffage, le COP de Carnot calculé - à partir des mesures - dans nos logements se situe entre 7 et 14, et le facteur de Carnot oscille entre 0,2 et 0,4 comme le présente la Figure 71.

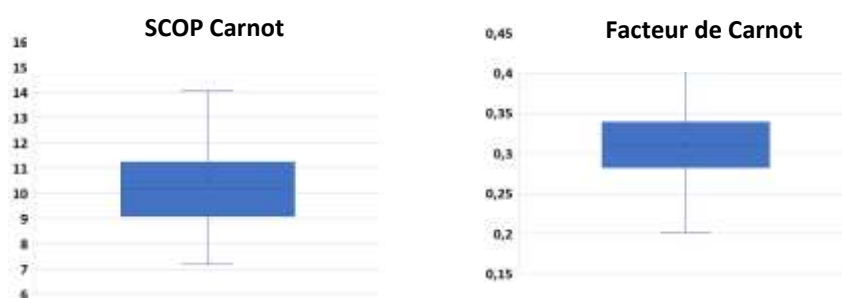


Figure 71 : SCOP Carnot et facteur de Carnot mesurés dans les logements de l'échantillon (toutes les PAC, hors points « hors norme »)

Le COP_{CARNOT} calculé dans notre campagne est donc principalement influencé par les températures de production (loi d'eau, température de production d'eau chaude sanitaire) et par la température de la source froide.

Le facteur de Carnot f , qui représente la distance à laquelle la machine se situe du maximum théorique, sera d'autant plus faible que la PAC présente des signes de dysfonctionnements. Il est donc attendu qu'il soit lié au fonctionnement des résistances d'appoint, des auxiliaires, de la part des veilles et aux phénomènes de cyclage.

2. Résultats sur le chauffage

2.1. SCOP chauffage

2.1.1. Résultats généraux de la campagne de mesures

Le SCOP chauffage est l'indicateur représentant l'efficacité de production annuelle des pompes à chaleur pour ce poste. Les COP saisonniers mesurés sur chaque installation sont présentés sur la Figure 72.

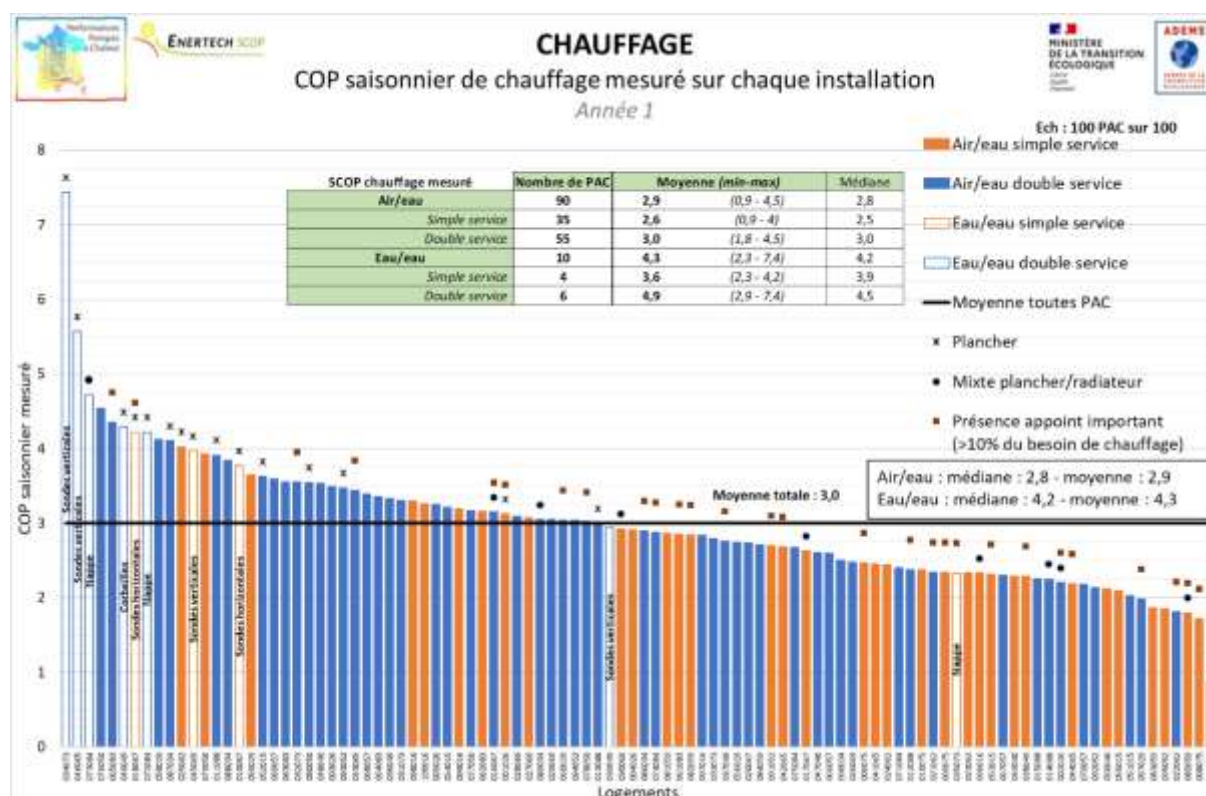


Figure 72 : SCOP mesuré sur chaque installation

Le SCOP mesuré moyen s'élève à 2,9 pour les PAC air/eau et à 4,3 pour les eau/eau. Il s'agit d'un bon résultat global qui cache une très grande variabilité :

- Certaines PAC air/eau présentent des SCOP spectaculaires, supérieurs à 4, dont les trois meilleurs (076050 / H2a / SCOP=4,54 ; 065083 / H3 / SCOP=4,35 ; 058029 / H2a / SCOP=4,12) sont des logements avec une installation sur radiateurs, ce qui est remarquable. Le meilleur SCOP en PAC air/eau sur radiateur et en zone H1 est réalisé par le logement 069057 avec un SCOP de 3,59. En plancher chauffant, deux des 3 meilleurs SCOP (4,10 ; 4,02 ; 3,91) se trouvent en zone H1.
- A l'inverse on déplore en PAC air/eau 7 SCOP inférieurs à 2 (le plus faible, inférieur à 1, étant une panne avérée), 31 SCOP inférieurs à 2,5 et 52 SCOP inférieurs à 3,0. Les analyses unitaires menées

lors de la réalisation des fiches à destination des occupants montreront que des SCOP inférieurs à 3,0 offrent en général une ou des piste(s) d'optimisation significatives.

- Les PAC double-service sont 10% plus performantes que les simple-service.
- A noter l'excellent résultat de la PAC du logement 034073 avec un SCOP de 7,4 (PAC eau/eau sur sondes verticales). Cette installation, dont le propriétaire travaille en bureau d'études fluide, est un cas atypique d'une PAC « suroptimisée », peu représentative de l'état moyen du parc existant mais fixant un horizon des performances maximum atteignables avec cette technologie de PAC.

En considérant l'échantillon des 90 PAC air/eau, la présence ou non d'un appoint de chauffage significatif (poêle granulé, insert, cheminée) dans le logement n'implique pas une différence importante sur le SCOP. Le SCOP chauffage des logements équipés d'un appoint significatif (c'est-à-dire représentant plus de 10% du besoin total de chauffage) s'élève à 2,7 en moyenne contre 2,9 sans. Une analyse approfondie de cet écart a montré qu'il s'agissait plus d'un biais d'échantillon que d'un effet sur les régulations ou le fonctionnement des PAC.

La Figure 73 présente les SCOP chauffage mesurés pour les PAC air/eau.

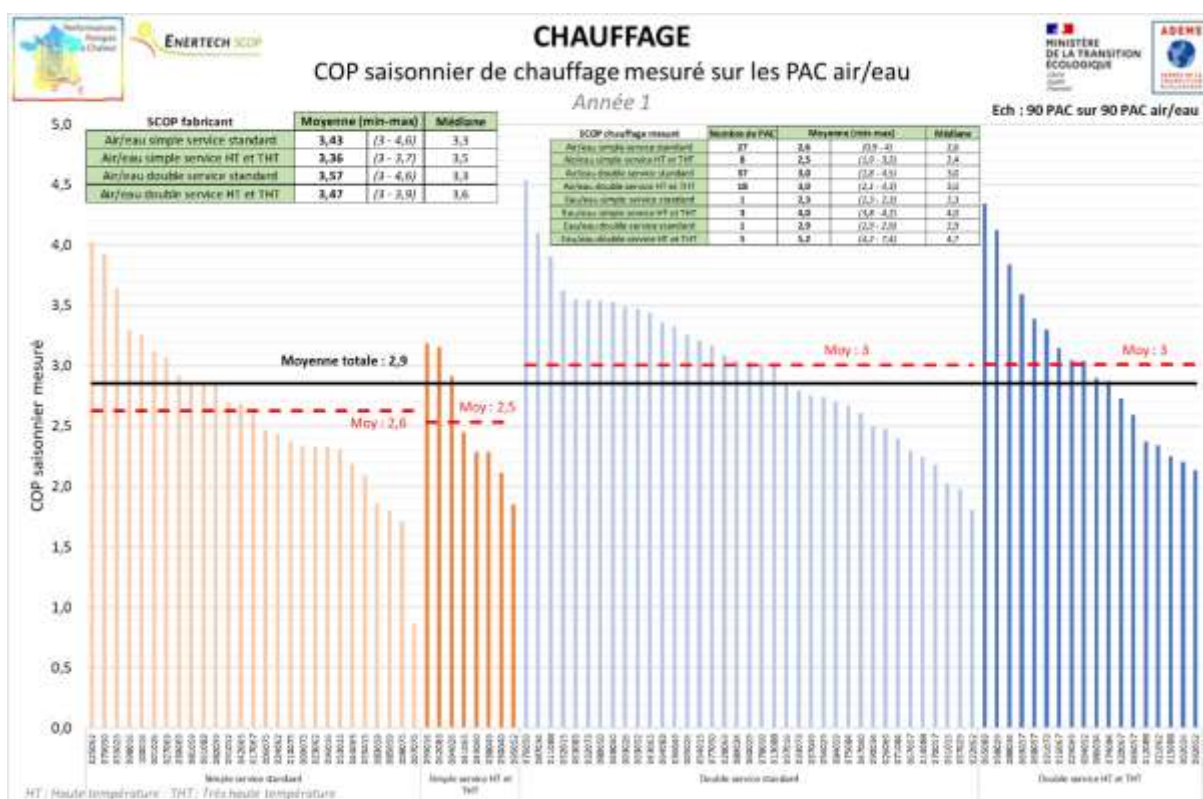


Figure 73 : COP saisonnier (SCOP) chauffage mesuré sur les PAC air/eau

La Figure 73 confirme la **tendance que les SCOP chauffage des PAC double-service sont meilleurs que ceux des simple-service**. A noter, cette différence est deux fois plus importante avec les données mesurées qu'avec les SCOP fournis par les fabricants dans les caractéristiques techniques des machines.

Aucune dégradation franche du SCOP chauffage n'est constatée par le caractère haute température (HT ou THT) ou non de la PAC.

La Figure 74 présente les SCOP chauffage mesurés pour les PAC eau/eau.

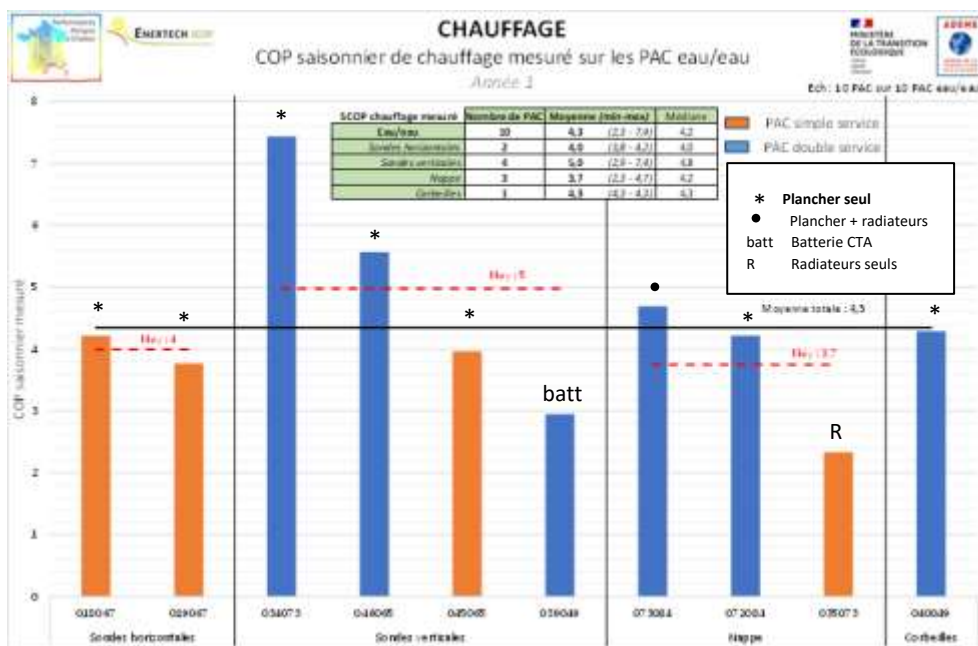


Figure 74 : COP saisonnier (SCOP) chauffage mesuré sur les PAC eau/eau

Bien que l'échantillon des PAC eau/eau soit moins important et donc moins significatif, nous mesurons **une avance assez nette des sondes verticales par rapport aux autres types de captage géothermiques**. Les PAC sur eau de nappe souffrent de la puissance importante de leur pompe de nappe, grevant leur performance globale par rapport aux sondes verticales où les pompes sont plus modestes. **Les sondes horizontales et les corbeilles** présentent, comme cela sera présenté plus spécifiquement au §2.1.3.3, **des températures de source froide moins constantes et plus froides** que celles mesurées pour les sondes verticales.

2.1.2. Comparaison avec le SCOP fabricant (ERP)

Parmi les caractéristiques techniques fournies par les fabricants, le SCOP (coefficient de performance saisonnier) est celui qui répond le mieux au besoin d'évaluer *a priori* la performance d'une PAC sur l'ensemble d'une saison de chauffe. Etant évalué à partir de points de mesures spécifiques réalisés en laboratoire (cf. Partie 3), **il est attendu qu'il soit différent des SCOP mesurés en conditions réelles**. L'objet du graphique de la Figure 75 est de caractériser la différence entre le COP saisonnier théorique, fourni dans la documentation technique des PAC, et celui mesuré.

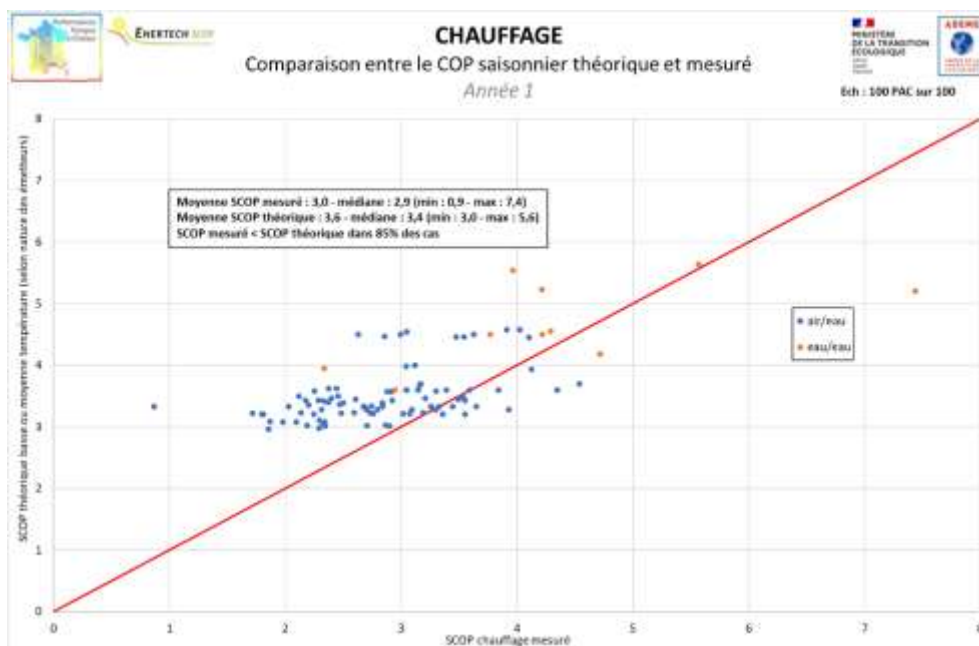


Figure 75 : Comparaison entre le SCOP chauffage théorique donné par le fabricant et le SCOP mesuré

Les SCOP fabricant sont en moyenne supérieurs aux valeurs mesurées dans :

- 85% des cas si l'on considère l'ensemble des PAC de l'échantillon. La moyenne de la surcote est de 1,29 (minimum 0,82, maximum 3,84).
- 86% des cas pour les PAC air/eau. La moyenne de la surcote est aussi de 1,29 (minimum 0,82, maximum 3,84).
- 80% des cas pour les PAC eau/eau. La moyenne de la surcote est de 1,15 (minimum 0,7, maximum 1,69).

L'analyse des SCOP fabricants issus de la réglementation ERP est reprise en partie 3.

2.1.3. Paramètres explicatifs des SCOP chauffage mesurés

Les résultats mesurés montrent une bonne performance moyenne des pompes à chaleur pour la production de chauffage dans le résidentiel français. La grande variabilité observée entre les logements pose la question des grandeurs d'influence permettant de caractériser ces écarts. L'objet de cette partie est de voir quels paramètres se corréleront le mieux avec le SCOP chauffage mesuré.

2.1.3.1. Le SCOP de Carnot et l'efficacité par rapport à Carnot

Le graphique de la Figure 76 met en regard le facteur d'efficacité par rapport à Carnot aux SCOP chauffage mesurés.

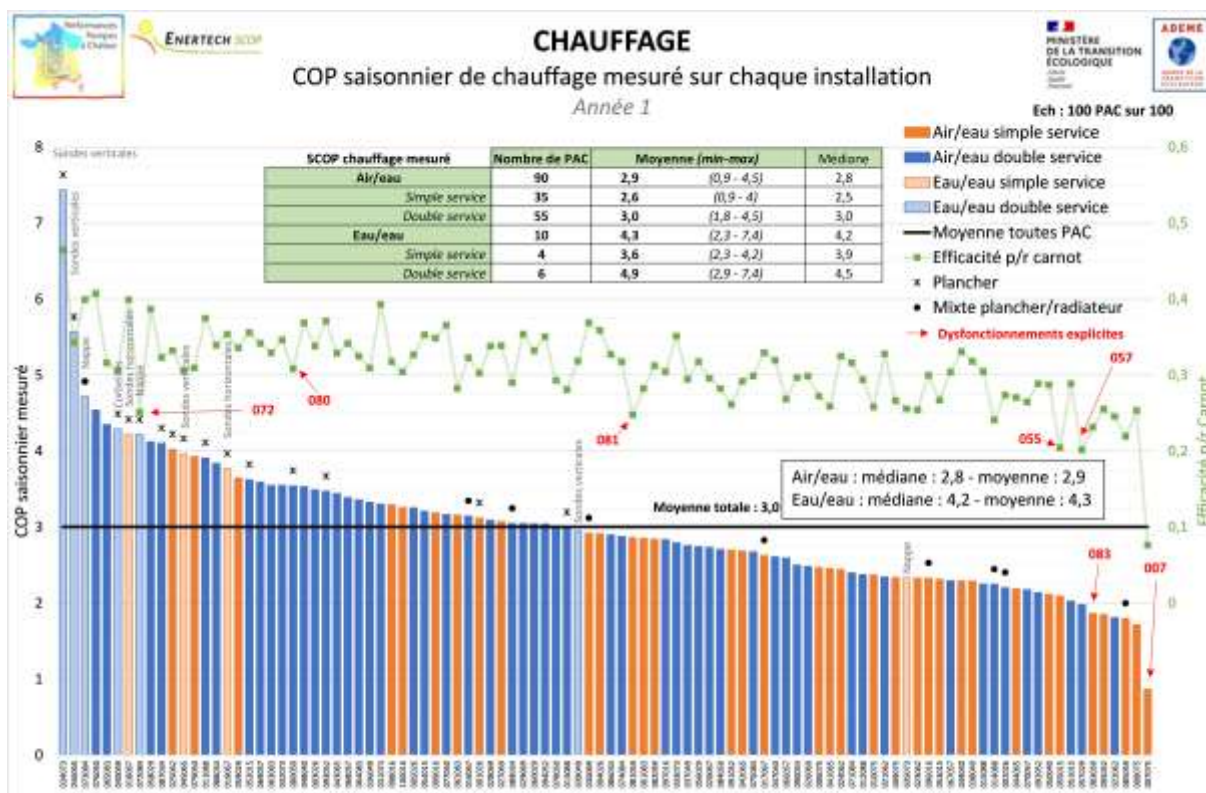


Figure 76 : COP saisonnier de chauffage sur chaque installation et facteur d'efficacité par rapport à Carnot

Bien que l'enveloppe des efficacités de Carnot soit assez resserrée, la double lecture du SCOP et du facteur de Carnot f permettent de pointer des pannes ou anomalies (dont certaines n'auraient pas été visibles avec le SCOP seul), dont voici les exemples les plus flagrants (signalés sur le graphique) :

- 007075 : PAC en panne, en manque de fluide frigorigène ? Pas de production de chaleur.
- 083059 : Panne résolue en cours d'année. Problème de câblage du thermostat faisant dysfonctionner la production de chaleur.
- 057029 ; 055015 et 081059 : Cyclage très excessif. A noter qu'il s'agit de PAC dont le reste à charge était de 1€.
- 080050 : Consommation excessive des circulateurs pendant la production de chauffage.
- 072084 : PAC sur nappe avec une pompe de surface très énergivore, d'une puissance électrique de 560 W.

La Figure 77 présente les SCOP Carnot mesurés pour le chauffage pour les PAC air/eau.

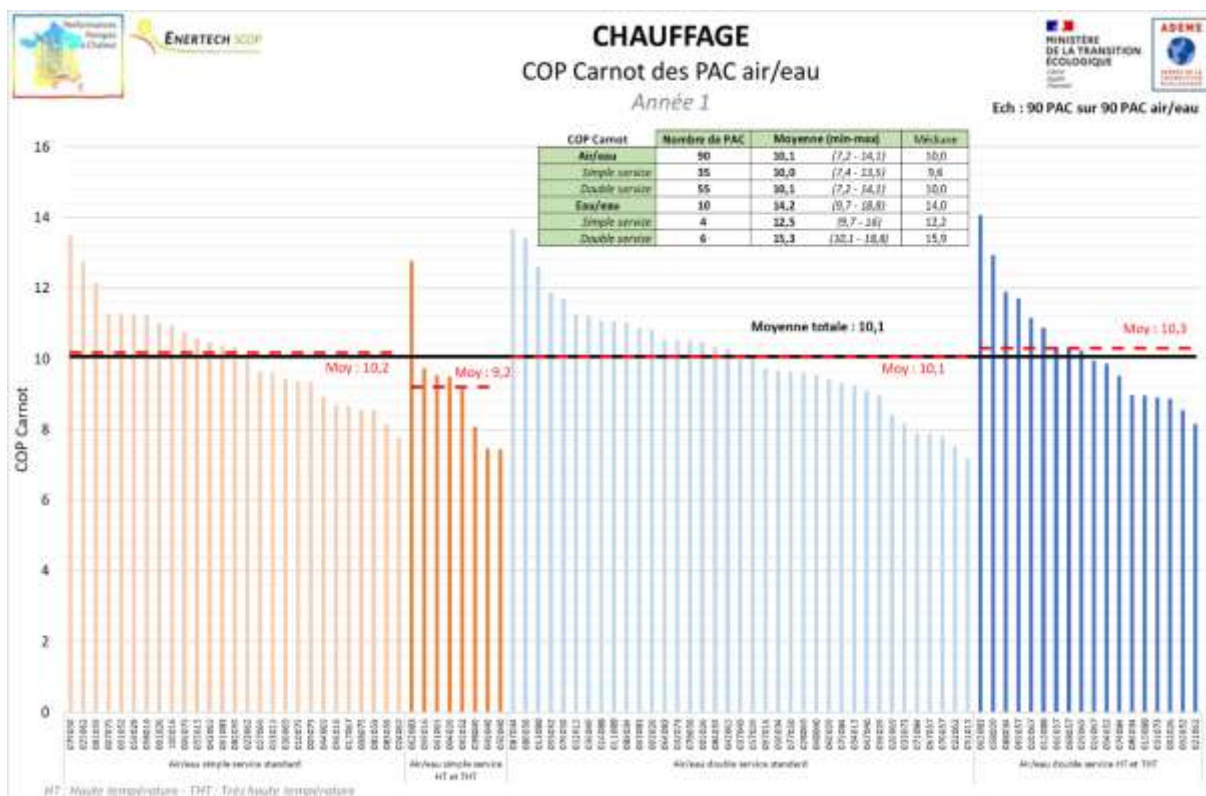


Figure 77 : COP saisonnier de Carnot (SCOP Carnot) chauffage mesuré sur les PAC air/eau

La moyenne du COP Carnot saisonnier vaut 10,2 pour les PAC air/eau. Le COP Carnot moyen est identique entre les PAC air/eau simple et double service : celui-ci étant lié uniquement à la température des sources froides et chaudes (voir §1.3.3), la différence de performance sur le SCOP chauffage d'une dizaine de pourcent à l'avantage des double-service ne provient donc pas d'un biais d'échantillon sur la météo ou de la température de la source chaude.

La Figure 78 présente l'efficacité par rapport à Carnot f des PAC air/eau. Sur ce graphique, nous observons bien une différence entre les PAC simple et double service, de l'ordre d'une dizaine de pourcent, en faveur de ces dernières. Ainsi, il en résulte que la différence mesurée sur les SCOP chauffage est liée à une différence d'efficacité par rapport à Carnot entre les PAC simple et double service. Autrement dit, cela signifie que cet écart de performance serait lié à la performance intrinsèque du cycle frigorifique de la machine, indépendamment de ses conditions de source froide et chaude.

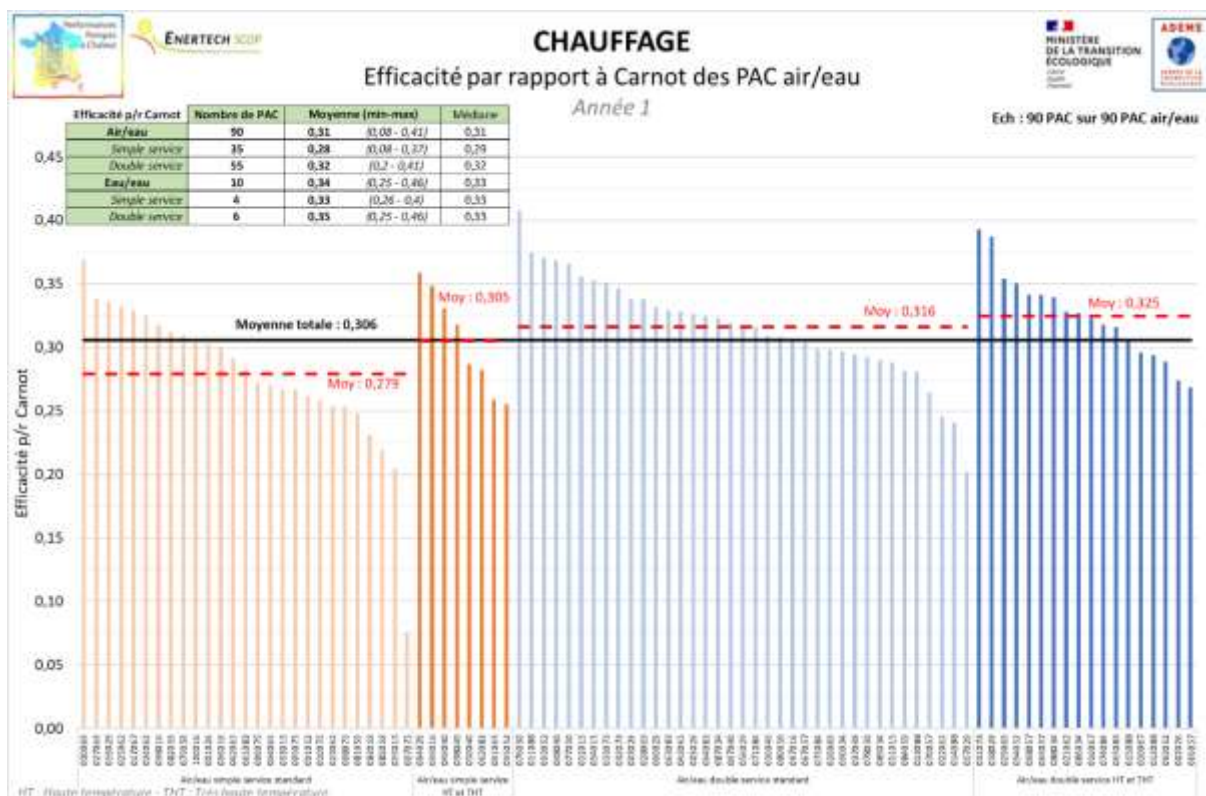


Figure 78 : Efficacité par rapport à Carnot des PAC air/eau

Etonnés de ce constat, nous nous sommes demandés si cette différence de SCOP entre les simple et double-service n'était pas liée à notre méthode de calcul et à l'affectation de la veille et des auxiliaires qui, dans le cas des simple-service, sont uniquement attribués à du chauffage alors que dans le cas des double-service, sont partagés avec l'eau chaude sanitaire.

Un recalcul des SCOP chauffage sans prendre en compte les auxiliaires et les consommations hors production montre que cette différence de performance subsiste toujours (Figure 79).



Figure 79 : Comparaison des SCOP chauffage mesurés entre les PAC simple et double service, avec et sans prise en compte des auxiliaires et veilles

Ces réflexions confirment donc que sur notre campagne de mesures, **les PAC air/eau double-service sont plus performantes que les simple-service pour la production de chauffage, et que cette différence est intrinsèquement liée à l'efficacité intrinsèque des cycles frigorifiques**. Une première piste d'explication pourrait être la conception qui n'est pas identique, avec possiblement des différences au niveau des échangeurs qui présenteraient des pincements différents. Une seconde piste serait liée au nombre d'heures de fonctionnement plus élevé pour les double-services (présence de cycles de production ECS) qui permettrait d'éviter statistiquement plus souvent les baisses de COP des compresseurs au début des cycles de chauffage.

La Figure 80 présente les SCOP Carnot mesurés pour le chauffage pour les PAC eau/eau.

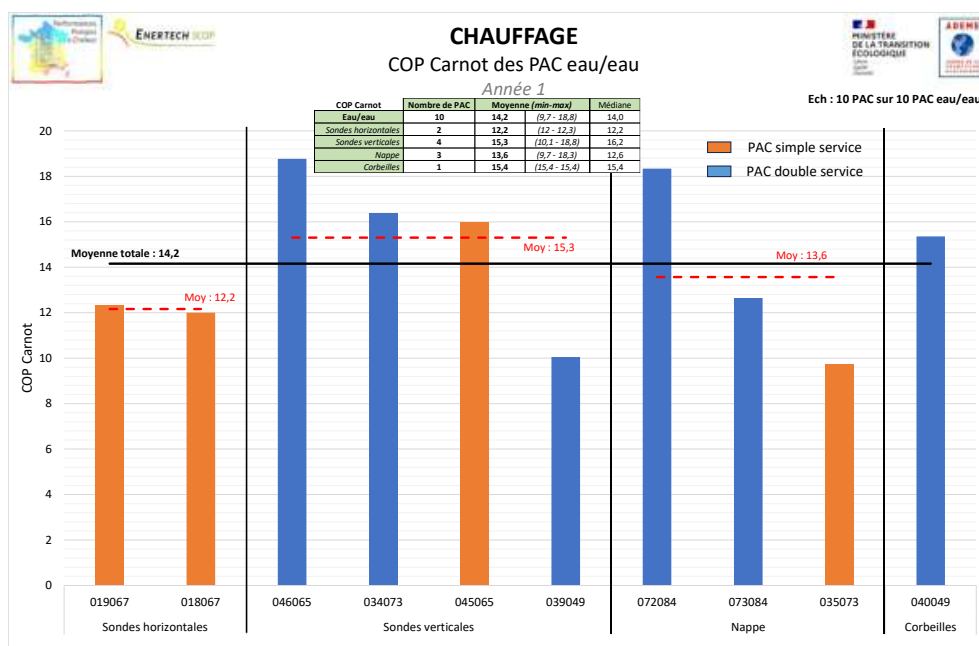


Figure 80 : COP saisonnier de Carnot (SCOP Carnot) chauffage mesuré sur les PAC eau/eau

La moyenne du COP Carnot saisonnier vaut 14,2 pour les PAC eau/eau (contre 10,2 pour les air/eau). Le COP Carnot moyen est bien **inférieur à la moyenne pour les sondes horizontales (à cause de la source géothermique qui est plus froide)** et pour le logement 035073, à cause d'une loi d'eau élevée nécessaire car la PAC alimente des radiateurs dans une ancienne maison.

La Figure 81 présente l'efficacité par rapport à Carnot f des PAC eau/eau. Ce graphique met en évidence **l'impact des pompes de nappes sur la perte d'efficacité de production**. Par ailleurs, le logement 034073 est remarquable sur cette figure puisqu'il présente une efficacité par rapport à Carnot exceptionnellement élevée de plus de 0,45 (ce logement étant le SCOP chauffage le plus élevé de l'échantillon).

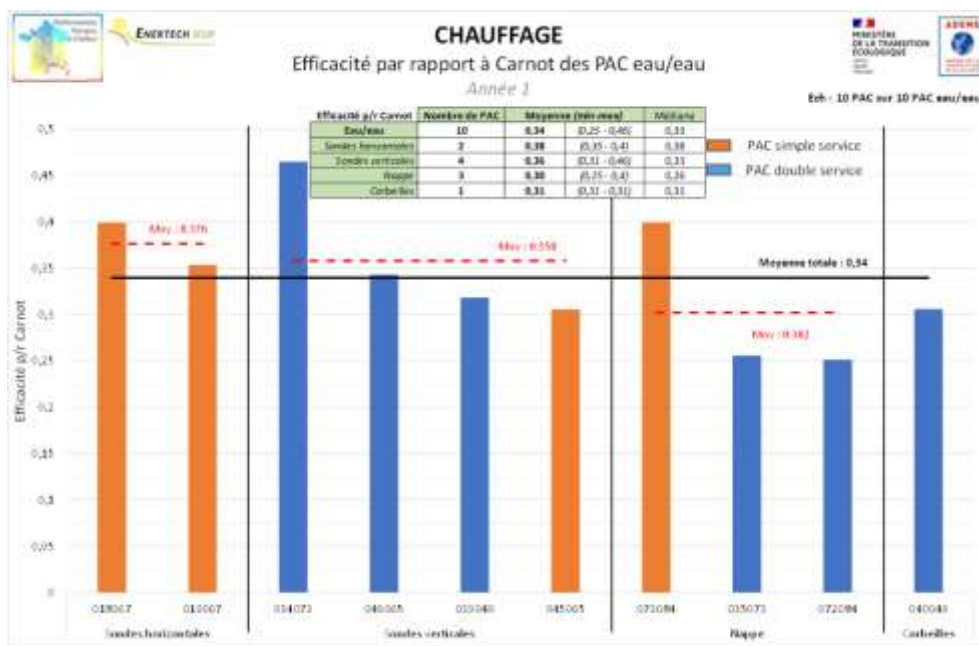


Figure 81 : Efficacité par rapport à Carnot des PAC eau/eau

2.1.3.2. Température de production du chauffage

Paramètre attendu pour être un déterminant majeur de la performance des PAC, la température de production du chauffage est une grandeur mesurée de première importance dans cette campagne de mesures. La Figure 82 présente la température de production du chauffage des logements de notre échantillon.

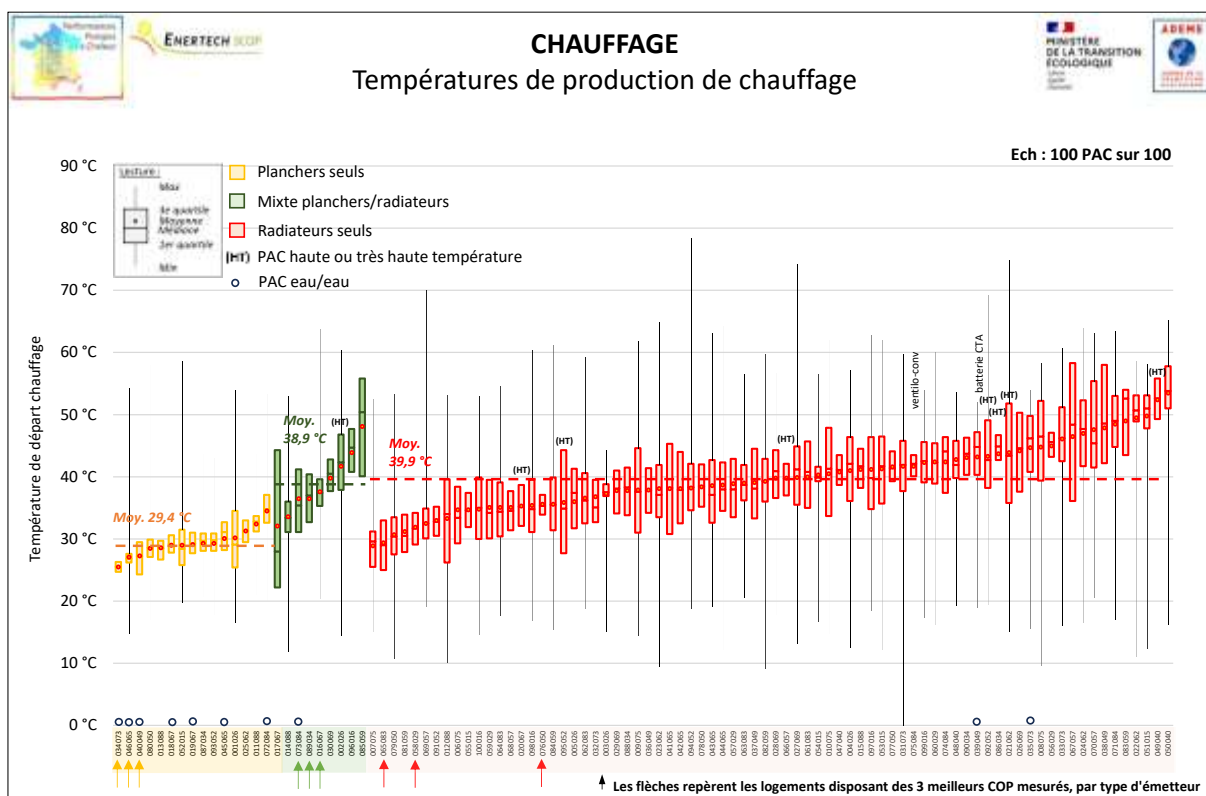


Figure 82 : Températures de production de chauffage de chaque logement, triées par moyenne croissante et par type d'émetteur

La Figure 82 met en avant la **variabilité spectaculaire** des températures de production pour le chauffage. Entre les logements équipés exclusivement de planchers-chauffants et les autres cas, nous mesurons 10°C d'écart en moyenne (29,4°C contre 39-40°C). Au sein de chaque catégorie d'émetteur, la **variabilité** autour de la moyenne est conséquente :

- Planchers seuls : 25,5 à 34,5°C, moyenne 29,4°C ;
- Mixte planchers/radiateurs : 32,1 à 48,1°C, moyenne 38,9°C ;
- Radiateurs seuls : 28,9 à 53,4°C, moyenne 39,9°C ;

Les logements disposant des meilleurs COP sont globalement ceux qui montrent les températures de production les plus basses (la réciproque n'étant pas vraie car d'autres paramètres peuvent dégrader le COP). Le logement 076050 (flèche rouge la plus à droite) fait exception : il s'agit d'un logement en zone H2, avec une température ambiante sobre (19°C) et disposant d'une PAC plus performante que la moyenne (notamment sans cyclage excessif ni veille significative).

Globalement la configuration d'émetteur « plancher chauffant seul » permet un abaissement moyen de la température de production d'une dizaine de degrés, expliquant une grande partie l'écart de COP moyen entre les PAC eau/eau (4,3) et les PAC air/eau (2,9). Les logements disposant de planchers chauffants ET de radiateurs ont des profils de production de température similaire aux logements en radiateur seul, ce qui peut être déploré (il serait vraiment intéressant dans ces cas de travailler à minimiser la température de production quitte à surdimensionner les radiateurs dans les chambres qui le nécessitent).

L'écart-type très variable des valeurs par logement montre aussi des cas de logements sans loi d'eau (dispersion très faible), ce qui peut être considéré comme une « malfaçon » à l'installation compte tenu de l'impact très négatif sur le COP.

On constate aussi que les PAC haute température ne correspondent pas aux températures de production les plus élevées. La même constatation sera faite sur la production ECS (§3.1.2.2), ce qui interroge sur l'intérêt de se doter de cette option qui occasionne parfois plus de complexité technique et un potentiel surcoût.

Cependant, en regardant les données à l'échelle de chacun des logements, il apparaît que la **loi d'eau est très parasitée lorsque les PAC cyclent de façon excessive**. En effet, dans ces cas, les périodes où la PAC produit de la chaleur sur des phases transitoires deviennent prépondérantes puisqu'elle ne reste que très peu en régime établi. La Figure 83 illustre ce phénomène, qui invite à la prudence sur l'interprétation des données et à analyser les graphiques temporels en parallèle avant de tirer des enseignements trop hâtifs sur la température de production du chauffage. De plus, plusieurs machines adaptent la température de production du chauffage en fonction de l'écart à la consigne d'ambiance mesurée avec le thermostat (facteur de compensation), ce qui complexifie la lecture du graphique mettant en relation la température de départ du chauffage en fonction de la température extérieure.

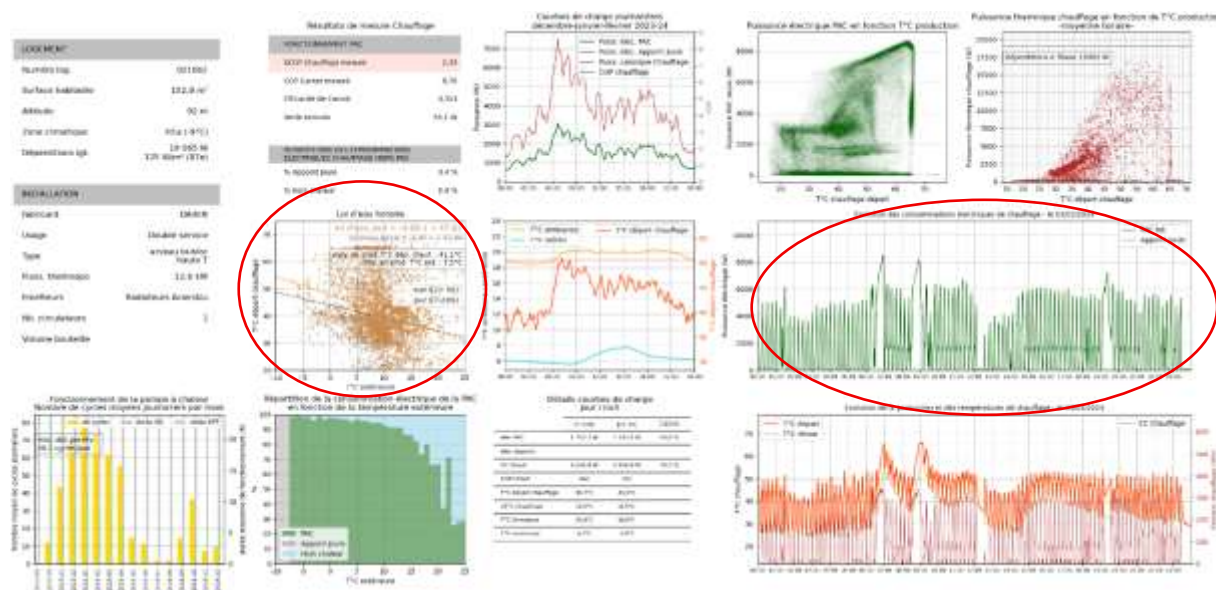


Figure 83 : Illustration de l'interprétation de la loi d'eau en cas de cyclage important

L'analyse détaillée des mesures, complétée par les investigations de terrain, montrent que les PAC n'utilisent pas la mesure de la température ambiante de la même façon. Sachant que même sans thermostat, certaines PAC calculent une valeur de température ambiante en fonction de leurs mesures (température de départ chauffage, température de retour chauffage, temps de réponse du réseau, inertie estimée de l'habitation, etc.). Après avoir interrogé les fabricants des PAC de notre échantillon à ce sujet, plusieurs familles semblent se dégager :

- Pendant le fonctionnement, certaines PAC corrigent la loi d'eau en fonction de son paramétrage, de la température ambiante et de la température extérieure. La PAC module donc sa température de départ et sa puissance en fonction de ces paramètres et peut, dans certains cas, se servir de cette température ambiante pour aussi commander le marche/arrêt du compresseur une fois la consigne atteinte (sans court-circuiter les sécurités anti court-cycles). Généralement, cette option n'est disponible chez les fabricants que si un thermostat de leur marque est installé (parfois, seuls certains types de thermostat proposés intègrent cette possibilité). Chez certains fabricants, le point de fonctionnement de la loi d'eau est lui-même évalué directement par les régulateurs à partir de l'environnement de travail de la PAC.
- La température ambiante peut servir à démarrer/arrêter la PAC sur contact sec seulement. Dans ce cas, la mesure n'a aucune autre influence sur la régulation que la demande ou non d'un circuit. C'est généralement le cas pour les thermostats qui ne sont pas de la même marque que la PAC, ou pour certains thermostats proposés par les fabricants qui n'intègrent pas la compensation d'ambiance.

Généralement, chaque fabricant a sa propre politique concernant la compensation d'ambiance : certains le proposent en base sur l'ensemble des machines vendues, d'autres le conseillent fortement et mettent les thermostats adéquats en option, pendant que certains sont plutôt sur des thermostats pilotant seulement le démarrage/arrêt de la PAC. Tout cela est souvent dépendant du fabricant, du type de thermostat, et de sa connexion avec la PAC (BUS, 0-10V ou ON/OFF). En fonction de la configuration, le pilotage de la PAC est différent. Il est donc parfois délicat, même pour des PAC de la même marque et référence, d'expliquer de quoi résulte la température de départ du chauffage tant les situations peuvent être différentes pour un même matériel. De notre ressenti, la compensation d'ambiance fait plutôt consensus et tend à se standardiser mais cela n'est qu'une interprétation des échanges que nous avons eu avec les fabricants.

A partir de nos relevés des régulations sur site et d'échanges avec les fabricants, nous présentons sur la Figure 84 une estimation de la part des PAC de l'échantillon pilotant la température de départ chauffage avec une compensation de la consigne sur la température d'ambiance. Malgré l'absence d'information sur près d'un tiers de l'échantillon, il semble que la majorité des PAC propose cette option de régulation aujourd'hui.

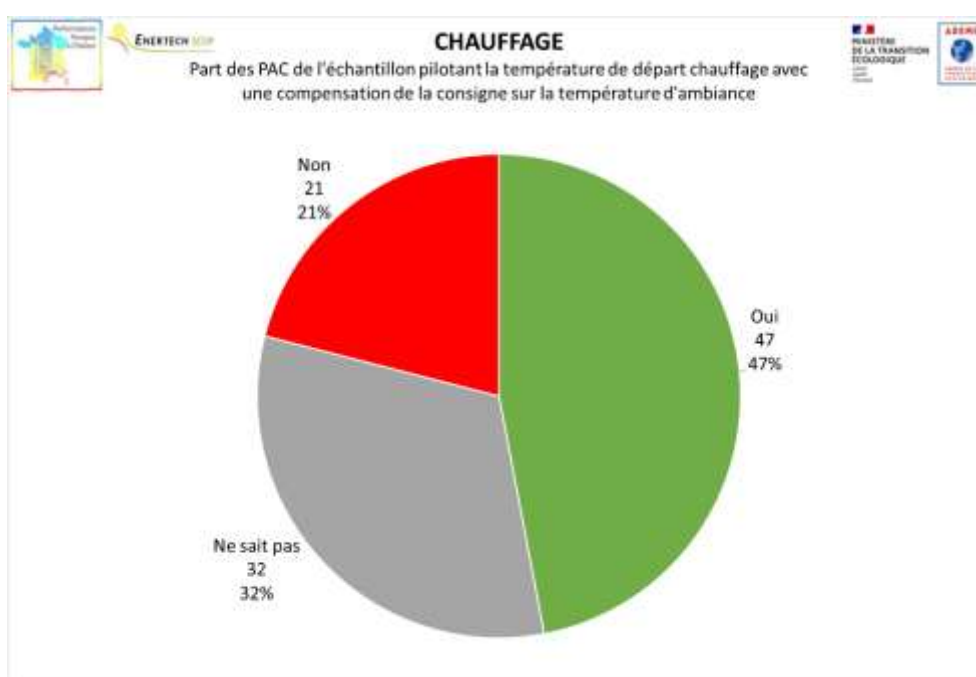


Figure 84 : Part des PAC de l'échantillon pilotant la température de départ chauffage avec une compensation de la consigne sur la température d'ambiance

Après avoir analysé le lien entre la loi d'eau et type d'émetteur, la Figure 85 étudie le **lien entre la température de production du chauffage et la déperdition des logements de l'échantillon**. Encore une fois, il apparaît que **le lien est très confus** entre ces deux grandeurs. À l'impact du cyclage et du facteur de compensation sur l'ambiance vus précédemment, s'ajoute aussi l'explication de **mauvais réglages et/ou pilotages de la loi d'eau**. La Figure 86 offre un aperçu de quelques lois d'eau au comportement bien différent pour illustrer la complexité de leur analyse.

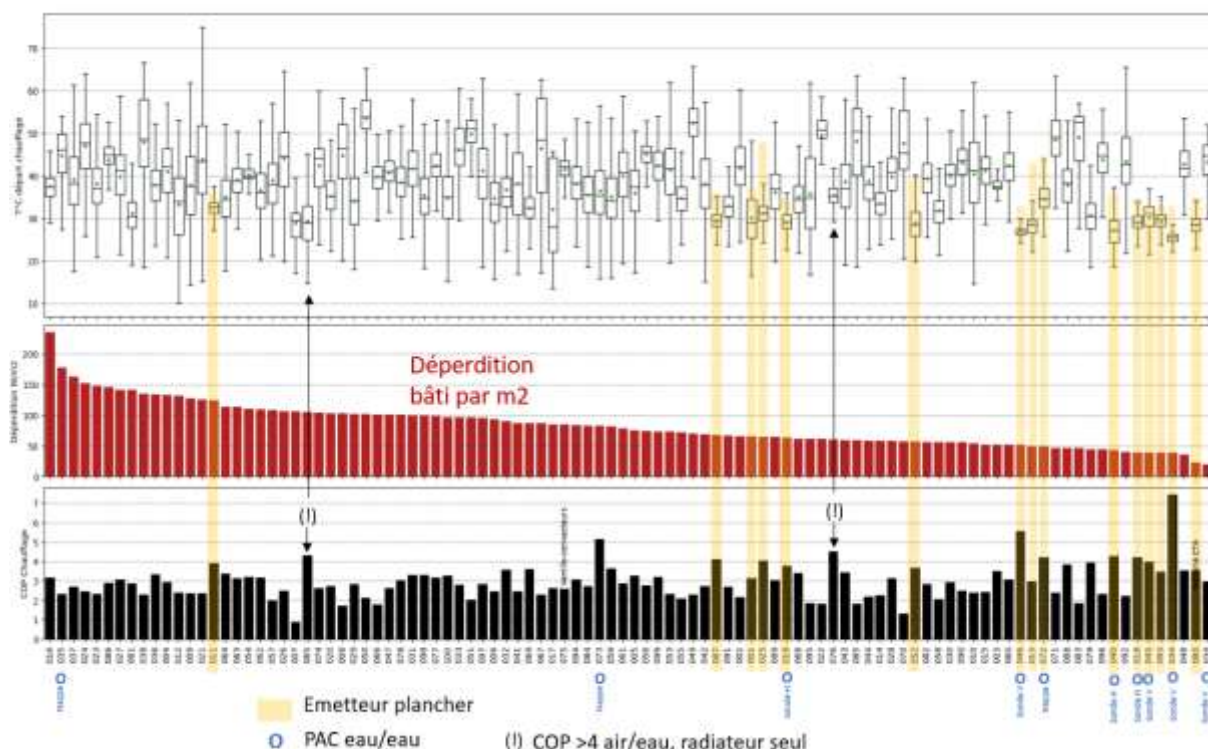


Figure 85 : Loi d'eau et déperditions

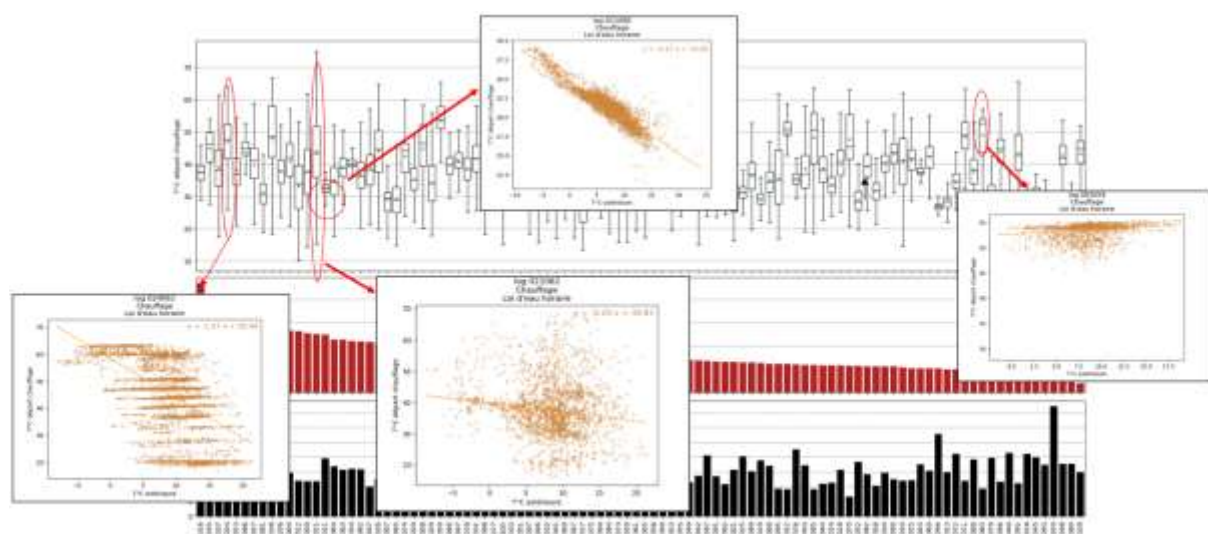


Figure 86 : Illustration de quelques lois d'eau

Les Figure 87 et Figure 88 montrent l'absence de corrélation entre la température de production du chauffage et la déperdition surfacique des logements, ce qui signifie qu'une marge d'optimisation du réglage de la loi d'eau existe dans de nombreuses habitations, compte tenu du surdimensionnement plus important des émetteurs dans les logements les mieux isolés.

On constate également dans le tableau de la Figure 88 que les corrélations entre la température de production et la zone climatique ne sont pas pleinement satisfaisantes (par exemple moyenne des températures plus élevée en zone H2 qu'en zone H1).

Ce point sera approfondi dans le cadre d'une analyse complémentaire pilotée par RTE.

A noter, dans le cas où la PAC module la loi d'eau sur l'ambiance, la modification à la baisse de ses réglages est moins « critique » : même si la courbe de chauffe est réglée trop basse (tout en restant dans une

certaine plage raisonnable autour du bon réglage), la compensation viendra la corriger en fonction de la température d'ambiance.

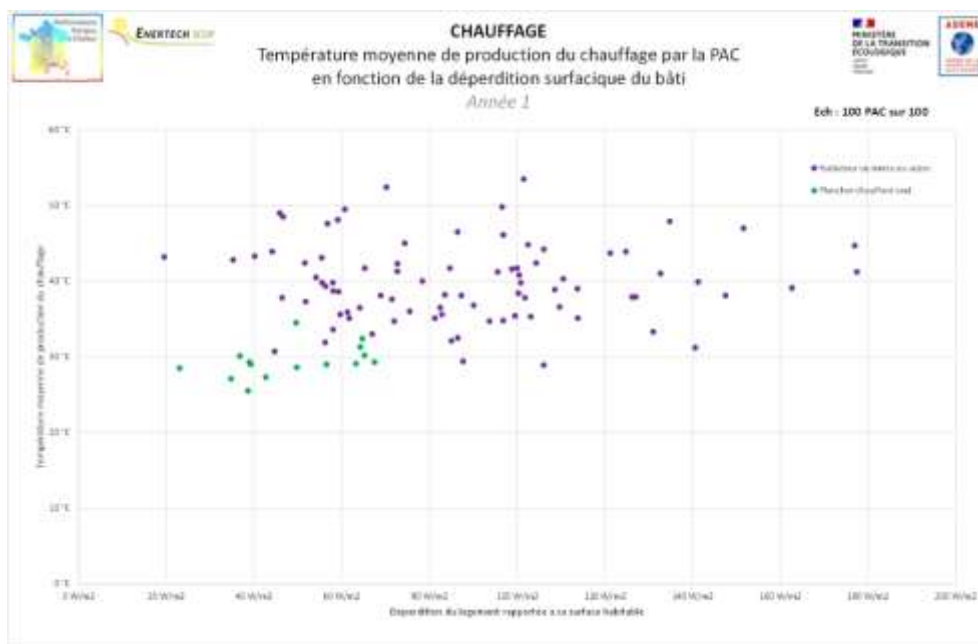


Figure 87 : Température de production du chauffage en fonction de la déperdition surfacique

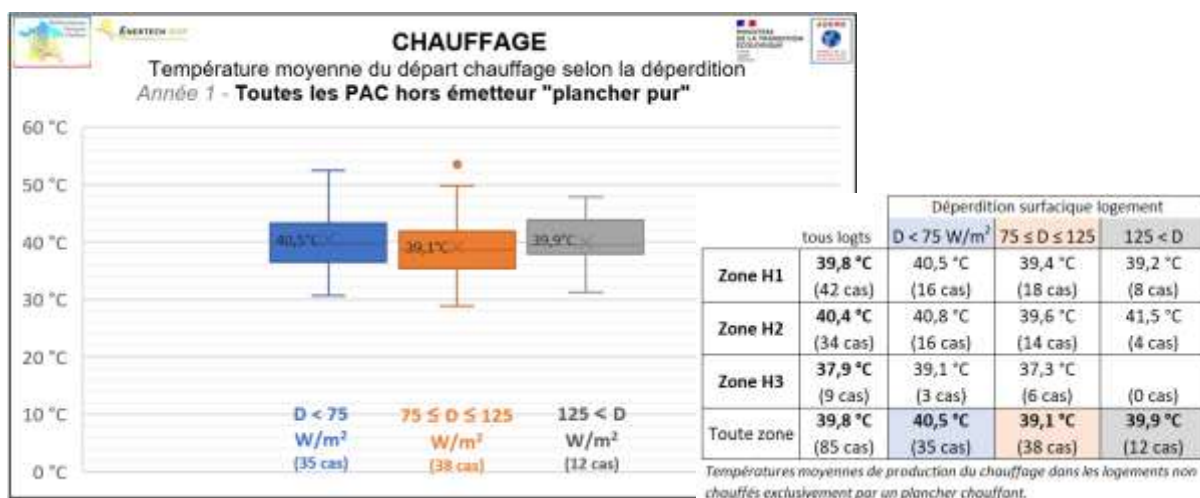


Figure 88 : Températures moyennes de départ chauffage en sortie PAC, par groupe de déperdition surfacique, pour les logements équipés d'au moins un autre type d'émetteur que du plancher chauffant. Le tableau à droite donne le détail par zone climatique H1, H2 ou H3

2.1.3.3. Température de la source froide

La température de la source froide, tout comme la température de production du chauffage, entre dans le calcul du COP Carnot et est pressenti pour être un facteur d'influence important des performances des PAC.

La Figure 89 présente la température mesurée de la source froide de chaque logement durant les périodes de production de chauffage. Il apparaît que la température de la source froide des PAC eau/eau sur sondes horizontales n'est pas toujours plus chaude que l'air extérieur. Les températures de nappe

mesurées sont plutôt importantes (au détriment de l'utilisation de pompes puissantes²⁰), alors que les PAC sur sondes verticales semblent être un bon compromis entre la température puisée par géothermie et le dimensionnement plus modeste de circulateur. Encore une fois, une disparité importante est observée entre les logements : il y a presque 8°C d'écart en moyenne entre la PAC air/eau la plus favorisée et la plus défavorisée (respectivement 11,7°C de température de source froide en moyenne contre 4°C).

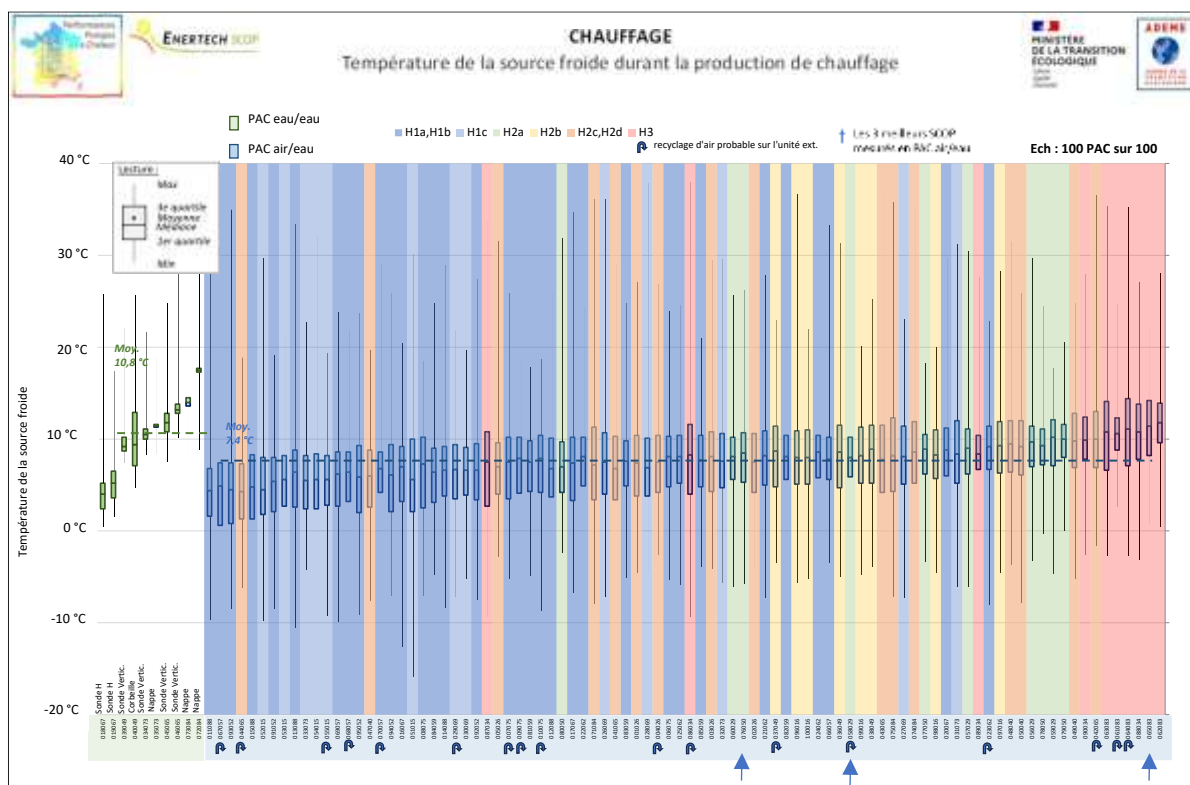


Figure 89 : Température de la source froide durant la production de chauffage

La Figure 89 met en avant que **les trois meilleurs SCOP mesurés sur des PAC air/eau ne sont pas toutes en zone H3** (zone au climat le plus chaud donc le plus favorable à la performance de la PAC). Nous avons reporté sur le graphique les logements susceptibles d'avoir du recyclage d'air au niveau de l'unité extérieure (obstacle, espace confiné, etc.). Bien que cette observation ne soit pas toujours vraie, les logements où cette problématique a été identifiée comme possible se situent bien souvent parmi les plus frais de leur zone climatique. Nous ne pouvons observer que des tendances puisque la grandeur tracée sur le graphique est la température de la source froide durant la production de chauffage, et qu'un logement concentrant sa production de chauffage en journée (programme horaire par exemple) et/ou avec une période de chauffe longue peut être avantagé sur ce graphique par rapport à un autre produisant en majorité la nuit, avec une période de chauffe concentrée sur les mois les plus froids, même si ce premier présente du recyclage au niveau de l'unité extérieure.

La Figure 90 rassemble les valeurs moyennes obtenues par région climatique. On observe une augmentation moyenne de 1,5°C en passant de H1 à H2 et une augmentation de 1,8°C en passant de H2 à H3.

²⁰ Les PAC sur nappes utilisent des pompes immergées ou de surface de forte puissance qui permettent de lutter contre la hauteur manométrique de relevage de l'eau, du fait du fonctionnement hydraulique en circuit ouvert.

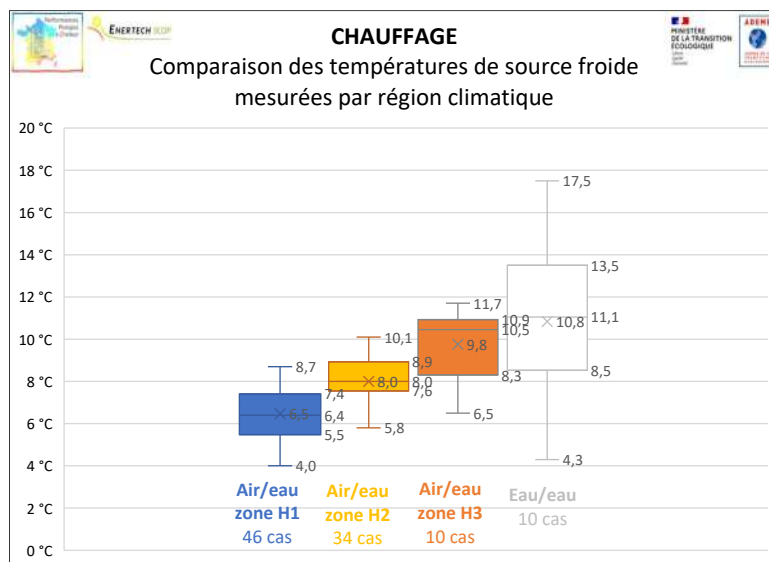


Figure 90 : Température moyenne de source froide mesurée par région climatique sur l'ensemble de l'échantillon.

2.1.3.4. Part des résistances d'appoint et des consommations hors production

La Figure 91 présente la répartition par usage de l'électricité consommée pour le chauffage sur l'ensemble des logements de l'échantillon. Le graphique met en évidence que **la part des résistances d'appoint, du dégivrage et des auxiliaires hors production de chaleur est faible à l'échelle de l'échantillon** (environ 7%). Malgré une vague de froid assez significative en janvier 2024, **les résistances d'appoint représentent 2,7% de la consommation d'électricité totale, ce qui est plutôt négligeable**. La consommation d'électricité liée au **dégivrage n'est pas un sujet**, et représente moins de 1%. La **consommation électrique hors production de chaleur** (veilles de cartes, circulateurs hors production, etc.) vaut près de 4% et est **supérieure à celle des résistances d'appoint**.

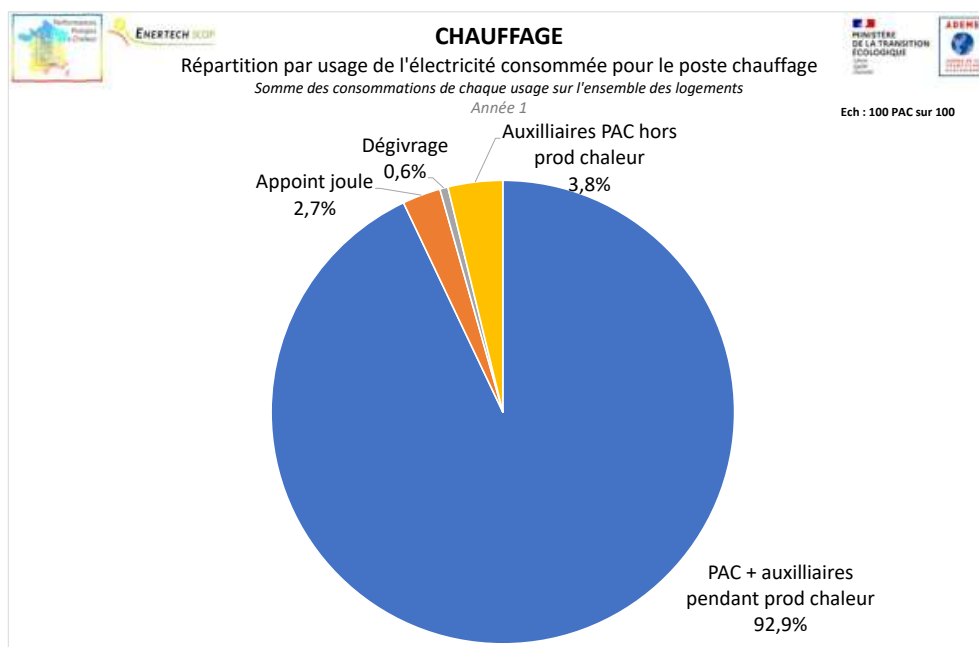


Figure 91 : Répartition par usage de l'électricité consommée pour le poste chauffage sur l'ensemble des logements

La Figure 92 montre qu'en rentrant dans le détail des logements, l'échantillon regroupe des **situations très disparates**. La part des résistances d'appoint, du dégivrage et des auxiliaires hors production de chaleur est **inférieure à 5%** de la consommation d'électricité **pour près de la moitié de l'échantillon** (42

logements, essentiellement des circulateurs et des veilles). Cette part augmente de **5 à 10% pour 37 logements**, avec une domination des circulateurs et des veilles hors production de chaleur, sans possibilité de discrimination à ce stade (voir les chapitres dédiés §2.1.3.6 et §2.1.3.7). Pour les cas où cet indicateur est **supérieur à 10%**, c'est-à-dire **20 logements**, nous relevons quelques **consommations importantes de résistances électriques d'appoint**, notamment dans les logements 010075 et 074084 où elles représentent autour de **30% de la consommation d'électricité totale de l'équipement**.

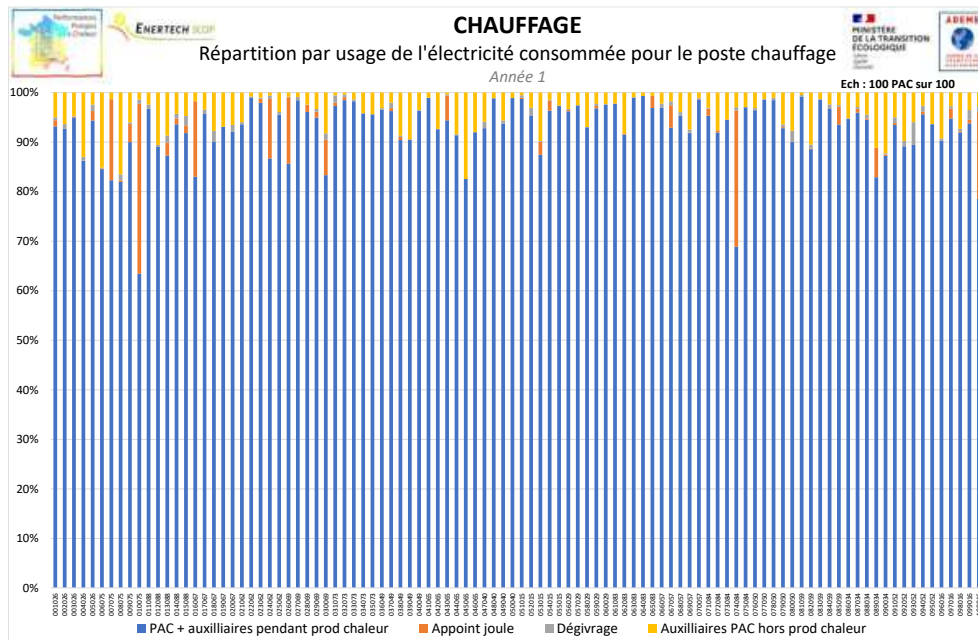


Figure 92 : Répartition par usage de l'électricité consommée pour le poste chauffage dans chacun des logements

2.1.3.5. Cyclage de certaines PAC

La campagne de mesures fait état d'un **cyclage très important d'un grand nombre de PAC de l'échantillon**. Par cyclage, nous n'entendons pas des courts-cycles mettant en péril immédiat l'intégrité du compresseur comme peuvent l'exprimer les frigoristes. Nous parlons davantage de défauts de régulation de PAC les menant, pour 51% de celles de l'échantillon, à **cycler en moyenne plus de 24 fois par jour** durant une saison de chauffe, là où nous sommes convaincus qu'**une meilleure modulation de puissance et gestion de l'allumage/extinction du compresseur permettrait de limiter ce chiffre à quelques unités**. A noter, même si l'intégrité du compresseur n'est pas compromise dans l'immédiat par ces courts cycles, **la multiplication des démarrages/arrêts induit une dégradation des performances de la PAC et une usure prématurée du compresseur à court ou moyen terme** selon les cas.

La Figure 93 montre le nombre de cycles moyen journalier de chaque PAC de l'échantillon en saison de chauffe. Le graphique met en avant que **les pires cas sont issus principalement de quelques fabricants**, et que **les machines cyclent pour certaines plusieurs fois par heure sur l'ensemble de la saison de chauffe**.

Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de ces cyclages : problèmes de régulation et/ou réglages (favorisés dans les cas de pilotage marche/arrêts de la PAC sur seuils de températures ambiantes), puissance de modulation basse insuffisante du compresseur au regard du besoin, sur-débit excessif au primaire d'une bouteille de découplage, etc.

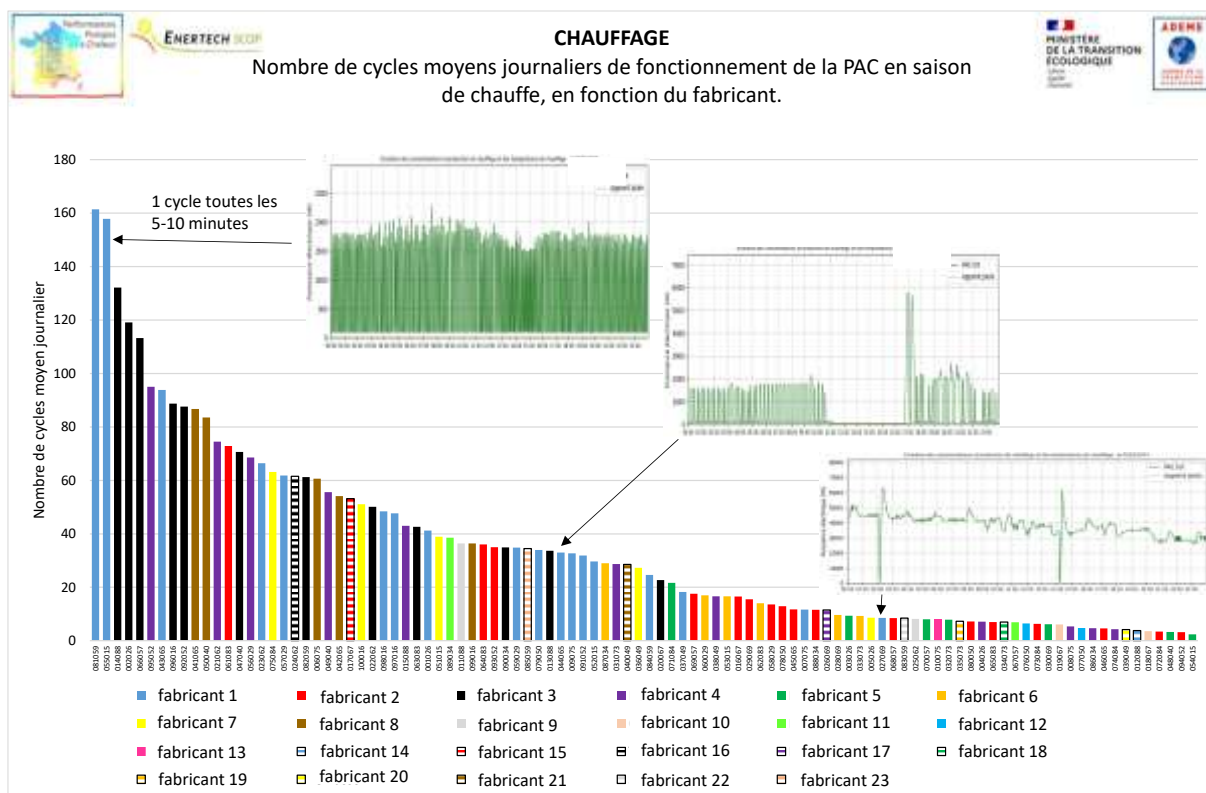


Figure 93 : Nombre de cycles moyens journaliers de fonctionnement de la PAC en saison de chauffe, en fonction du fabricant

En prenant l'exemple du logement 081059 (la PAC totalisant le plus grand nombre de cycles annuel), nous n'observons aucune dépendance du nombre de cycles à la saison (aucune diminution en mi-saison). Bien que sous-dimensionnée en rapprochant sa puissance thermique aux déperditions de la maison, la PAC n'atteint que rarement sa puissance nominale alors qu'elle ne parvient pas à chauffer convenablement le logement. La loi d'eau relevée sur site indique une température de départ chauffage réglée à 57°C pour -10°C extérieur, température qui n'est jamais atteinte, et de très loin. La Figure 94 présente, en complément, les principales données mesurées sur ce logement.

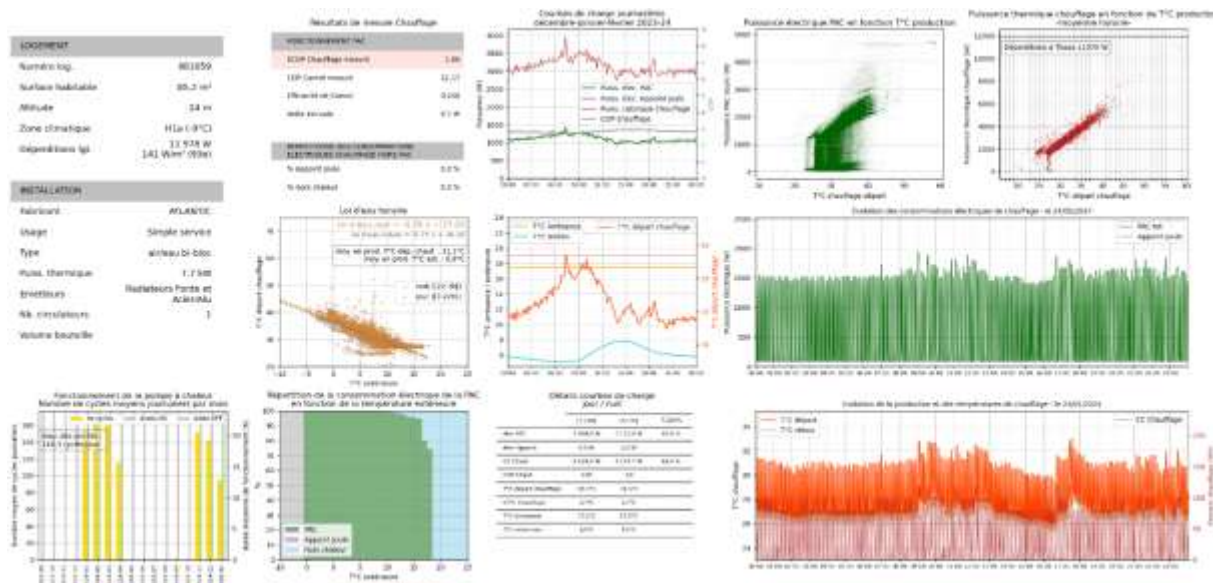


Figure 94 : Graphiques principaux faisant état du fonctionnement de la PAC du logement 081059

Nous pourrions nous attendre à ce que ces cyclages soient liés à des surdimensionnements des PAC par rapport aux déperditions des logements. La Figure 95 met en relation le nombre moyen de cycles journaliers et le coefficient de surdimensionnement de la PAC de chaque logement. Ce dernier est calculé en divisant la puissance nominale de la PAC à la température extérieure de base (demandée au fabricant) par les déperditions du logement.

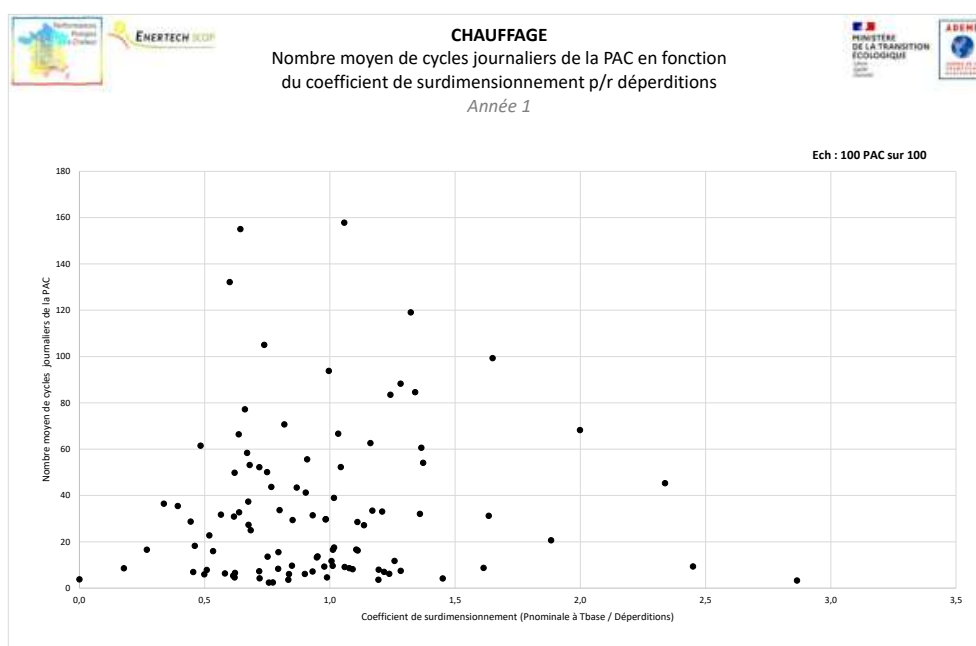


Figure 95 : Nombre moyen de cycles journaliers de la PAC en fonction de son surdimensionnement

Les problèmes de cyclages rencontrés ne sont pas corrélés au surdimensionnement des PAC (aucune corrélation sur la Figure 95). Le problème de cyclage serait donc lié à des **problèmes de réglages, ou de mise en œuvre**. Un **problème intrinsèque à la régulation** semble une piste à privilégier étant donné que les cyclages excessifs se concentrent principalement sur une poignée de fabricants.

Des échanges ont été engagés avec quelques industriels. Nous espérons pouvoir mener ces discussions à leur terme pour pouvoir tirer des enseignements qui s'avéreront précieux pour la performance des PAC concernées, et pour étoffer des points d'attention à valoriser à l'échelle de l'ensemble de la filière.

2.1.3.6. Consommation électrique hors production

La Figure 96 présente la puissance électrique minimale mesurée de chaque PAC de l'échantillon en saison de chauffe, en dehors des périodes de production de chaleur. Les données présentées sont donc les puissances de veille ou des auxiliaires (hors appoint joule) tels que les circulateurs, les veilles des cartes électroniques, les résistances annexes (carter), etc.

En moyenne, cette puissance électrique vaut **25 W** sur l'ensemble des logements, mais cache une nouvelle fois une **grande disparité** puisque la plus faible puissance mesurée vaut **3,2 W**, et la plus importante **160 W**, soit un **rapport de 1 à 50**.

Dans **15% des cas**, la puissance électrique minimale hors production de chaleur sur la saison de chauffe dépasse les **50 W**, ces logements étant **centrés sur quelques fabricants seulement**. En considérant environ 4000 heures hors production de chaleur, **cette puissance de 50 W représente une consommation de 200 kWh d'électricité**. La **surconsommation associée à ces puissances pour le pire cas (160 W) s'élève à 600 kWh/an**, ce qui est considérable.

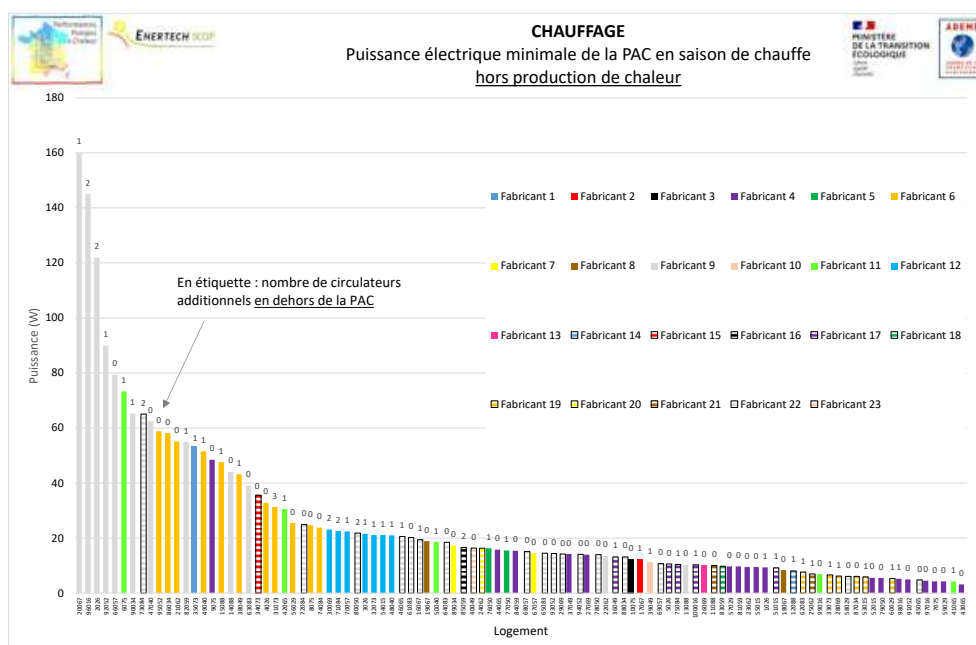


Figure 96 : Puissance électrique minimale de la PAC en saison de chauffe hors production de chaleur

Devant ce constat, nous avons analysé en détail sur site la puissance électrique hors production de chaleur du logement 002026 (3^{ème} sur la Figure 96, avec une puissance de 120 W), en réalisant une batterie de mesures instantanées complémentaires. Nous avons alors mesuré une puissance de veille importante sur l'unité extérieure de 58 W (probablement la veille de la carte électronique), et un fonctionnement permanent du circulateur dans l'unité intérieure (49 W). Ces mesures complémentaires permettent de mieux expliquer la monotone des puissances électriques appelées hors production par cette PAC, présentée en Figure 97.

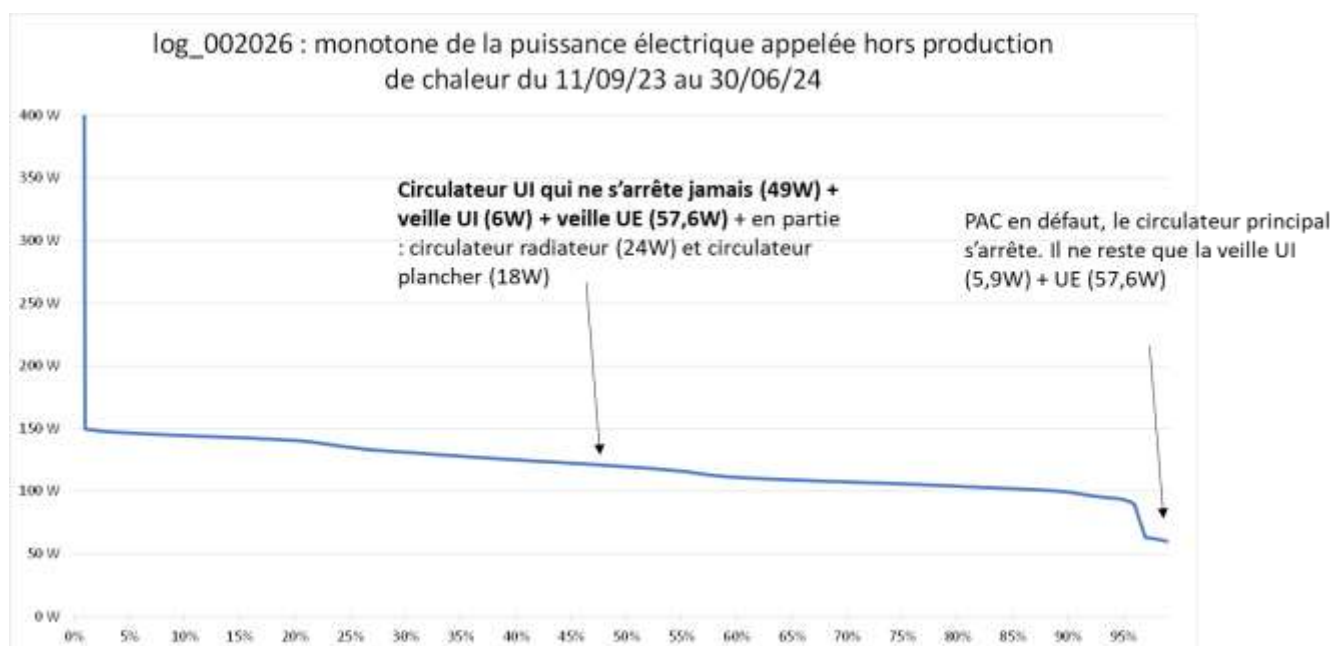


Figure 97 : Monotone de la puissance électrique appelée hors production de chaleur par la PAC du logement 002026

Si on considère la puissance électrique minimale hors production et **hors saison de chauffe**, présentée pour chaque logement en Figure 98, le problème semble légèrement amoindri, mais demeure tout de même un sujet persistant puisque cette puissance **excède les 10 W dans près des ¾ des cas**. Il est intéressant de constater que **les PAC simple service** (qui ne fournissent donc aucune chaleur hors saison de chauffe) **ne sont pas disjonctées** pour annihiler ces puissances importantes. Certains fabricants sont frileux à l'idée de disjoncter la PAC de peur que les circulateurs ne se grippent, puisqu'elle ne peut plus assurer le dégommage des pompes si elle n'est pas alimentée électriquement (le dégommage des pompes est une procédure visant à faire tourner régulièrement les pompes pour éviter leur grippage).

Bien que ce risque ne semble pas de première importance pour l'ensemble des fabricants, rien n'empêcherait les usagers de remettre tous les mois la PAC sous tension pour s'assurer que les pompes ne se grippent pas. **Dans les cas où les puissances hors production sont élevées (disons supérieures à 10W), et dans les cas où le « bouton off » ne permet pas de supprimer la veille des cartes, ou encore tout simplement en cas d'absence de « bouton off » (c'est le cas chez certains fabricants), disjoncter les PAC simple service hors saison de chauffe nous paraît recommandable.** Ce sujet de l'arrêt des PAC hors saison de chauffe ou en cas d'absence prolongée sera intégré aux recommandations de l'étude.

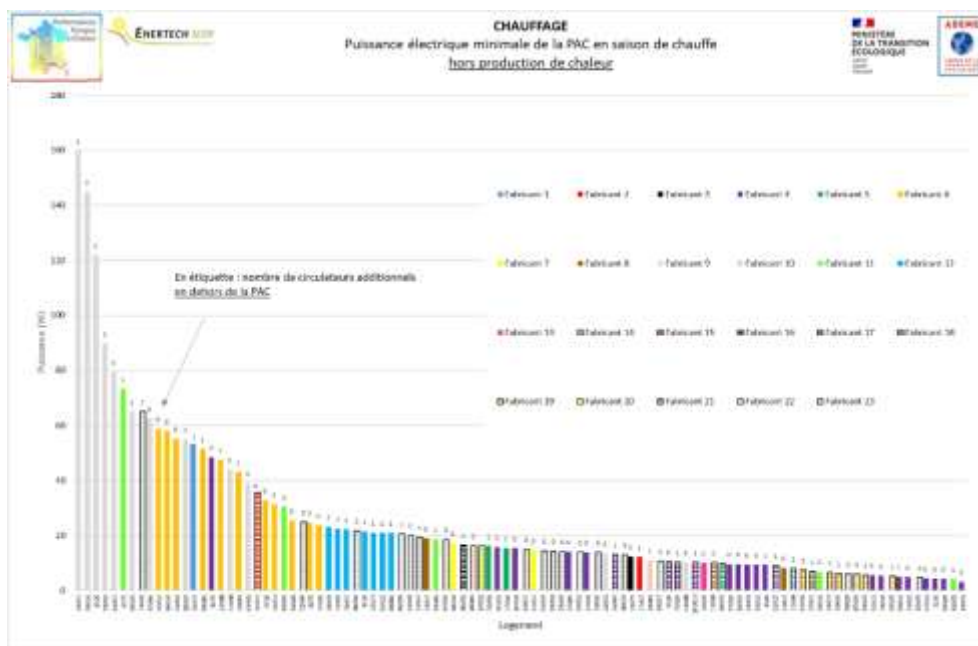


Figure 98 : Puissance électrique minimale de la PAC hors saison de chauffe hors production de chaleur

Il est très probable que les cas où une seule PAC d'un fabricant présente une anomalie relève plutôt d'un circulateur permanent ou d'une résistance en fonctionnement permanent dans l'unité extérieure (il s'agirait donc plutôt d'un problème de mise en service). Par contre, **lorsqu'une majorité de PAC d'un fabricant présente une puissance élevée, une cause inhérente à la machine ne peut être écartée** (veille importante de carte électronique, mauvaise régulation d'une résistance de carter dans l'unité extérieure, etc.).

Ces constats ont fait l'objet de discussions avec les fabricants concernés qui sont, à l'heure de la rédaction de ce rapport, en train de faire des visites techniques des installations afin d'identifier la source de ces puissances importantes. Les premiers retours ne fournissent pas d'explication probante, nous espérons pouvoir partager à la filière des conclusions plus robustes très prochainement.

2.1.3.7. Hydraulique des installations (débits, circulateurs, ΔT)

La performance d'une pompe à chaleur dépend nécessairement de la gestion des flux hydrauliques à ses bornes et sur le réseau. La question du **pilotage des circulateurs et des débits hydrauliques**, qui est un sujet complexe, devient alors de première importance pour comprendre concrètement ce qu'il se passe lorsque la PAC produit du chauffage.

Pour rappel, le périmètre de mesure de la consommation électrique des PAC s'apparente à une mesure de type SPF4 (cf. partie 1 §2.1), c'est-à-dire qu'il inclut l'unité intérieure, l'unité extérieure ainsi que l'ensemble des auxiliaires jusqu'aux circulateurs de distribution de chauffage secondaires le cas échéant (Figure 5). Les auxiliaires ne disposent pas de voie de mesure dédiée exceptées les résistances d'appoints dont il est demandé d'évaluer spécifiquement le fonctionnement.

2.1.3.7.1. Détermination des consommations des circulateurs

L'évaluation des consommations des pompes de circulation nécessite l'analyse des monotones des puissances électriques appelées. Sur les monotones, nous observons des paliers de puissance, comme cela est illustré sur le logement 014088 dans la Figure 99.

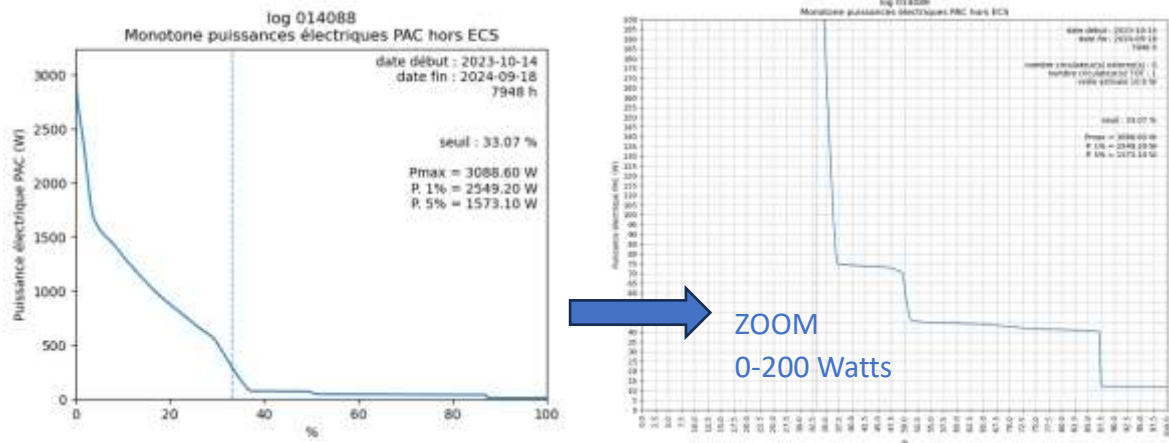


Figure 99 : Illustration d'une courbe de monotone électrique d'une PAC avec le logement 014088

Sur les monotones, les veilles (notamment des cartes électroniques) sont observées en été et dans certains creux hivernaux. Celles-ci étant constantes, nous pouvons aisément évaluer leur part dans la consommation totale de la PAC.

Sur les périodes sans fonctionnement de l'unité extérieure, le fonctionnement des circulateurs est détecté avec la présence ou non de débit (mesuré par les compteurs de chaleur), et les mesures de température. Pour évaluer la part des circulateurs lorsque l'unité extérieure est en fonctionnement, nous proposons de cadrer leur consommation par une plage d'estimation haute et une plage d'estimation basse :

- La plage d'estimation haute est évaluée en prolongeant le pallier haut de puissance électrique mesuré et attribué aux circulateurs hors période de fonctionnement de l'unité extérieure.
- La plage d'estimation basse reproduit le schéma de fonctionnement des circulateurs hors période de fonctionnement de l'unité extérieure, en réajustant l'échelle horizontale pour que les occurrences soient cohérentes.

La méthode employée est illustrée dans la Figure 100.

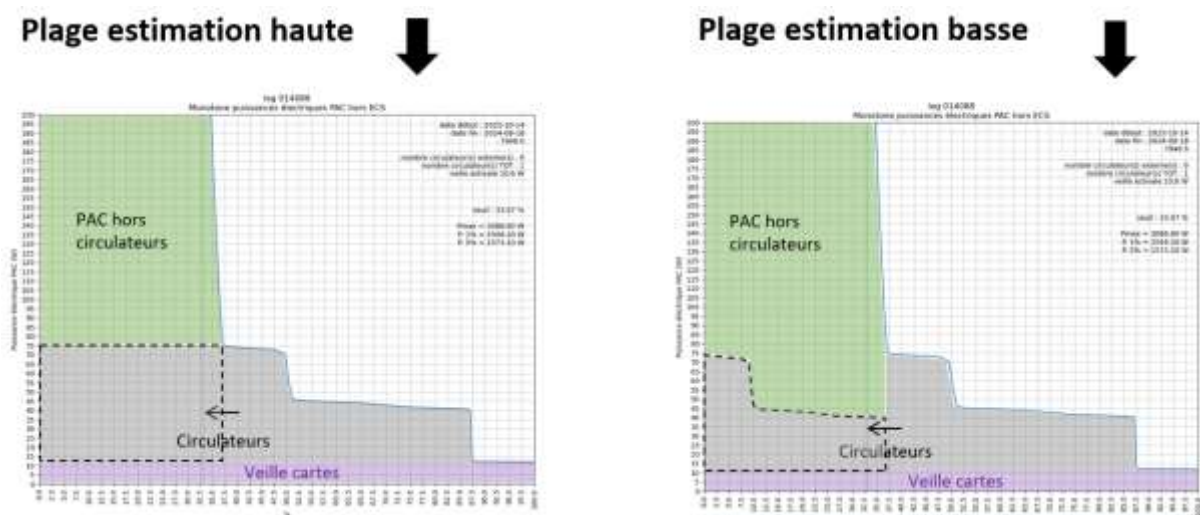


Figure 100 : Méthode employée pour cadrer la plage de consommation des circulateurs

La consommation estimée par cette méthode pour chaque logement est présentée dans la Figure 101. Nous précisons que cette méthode a été validée et éprouvée à partir de la mesure réelle de la

consommation des 2 pompes du logement 001026, où nous avons déployée la métrologie complémentaire nécessaire.

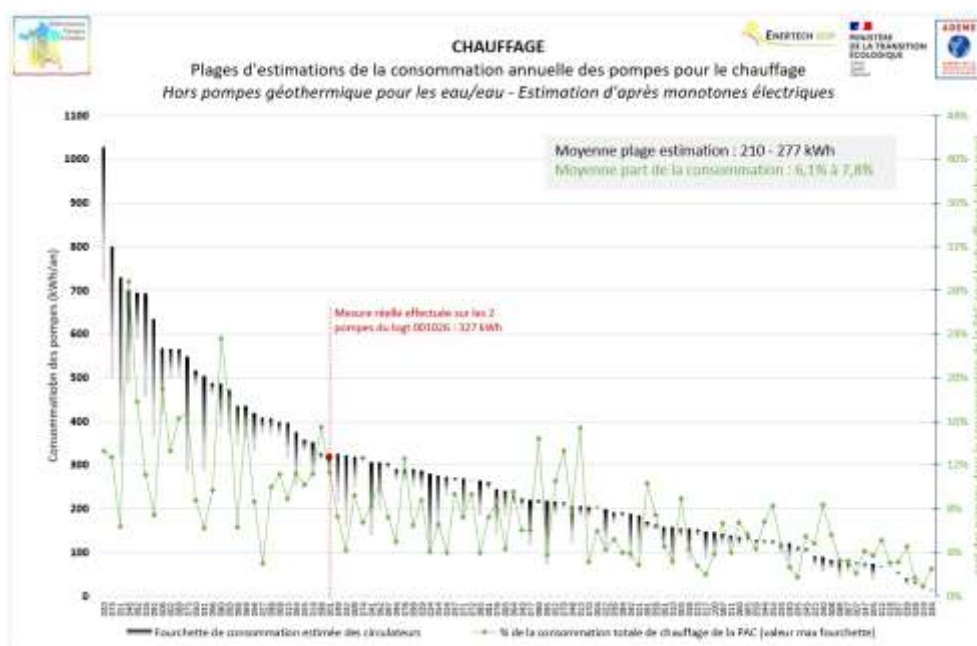


Figure 101 : Plages d'estimations de la consommation annuelle des pompes pour le chauffage

La plage des consommations électriques des circulateurs est très large puisqu'elle s'étend de 15 à 1000 kWh. A partir de ces estimations, il est possible d'évaluer l'impact des circulateurs sur le SCOP chauffage, ce qui est proposé sur la Figure 102 à partir des valeurs d'estimations hautes.

		moy	min	max
100 PAC	Globale	3,00	0,9	7,4
90 PAC	air	2,85	0,9	4,5
10 PAC	eau	4,35	2,3	7,4

Résultats de la campagne (SPF4)

		moy	min	max
100 PAC	Globale	3,28	0,9	7,8
90 PAC	air	3,11	0,9	5,0
10 PAC	eau	4,80	2,4	7,8

Estimation du résultat en SPF3

Figure 102 : Comparaison des SCOP mesurés avec et sans prise en compte de la consommation des circulateurs hors source froide (valeur d'estimation haute)

La comparaison des SCOP avec et sans prise en compte de la consommation des circulateurs (en considérant leur estimation maximale) montre que son impact serait de l'ordre de 7 à 9%, soit 0,2 à 0,3 point de COP. Il s'agit là d'une majoration de l'impact puisque nous avons considéré, pour le calcul, l'estimation maximale pour la consommation des pompes (maximisant donc au passage leur impact), qui s'avère plus proche de la réalité sur le seul cas mesuré. Ces éléments justifient le parti pris de ne pas déployer l'instrumentation lourde complémentaire nécessaire à l'évaluation précise de la consommation des circulateurs. Le « risque » technique, le temps et le coût supplémentaire n'auraient pas été raisonnables pour caractériser précisément moins d'une dizaine de pourcent d'impact.

2.1.3.7.2. Paramètres explicatifs de la consommation des circulateurs

PUISANCE MAXIMALE ET DUREE DE FONCTIONNEMENT

La Figure 103 présente la puissance maximale des circulateurs de chauffage. Les logements sont triés dans le même ordre qu'en Figure 101, c'est-à-dire par consommation annuelle d'électricité estimée pour les circulateurs, décroissante.

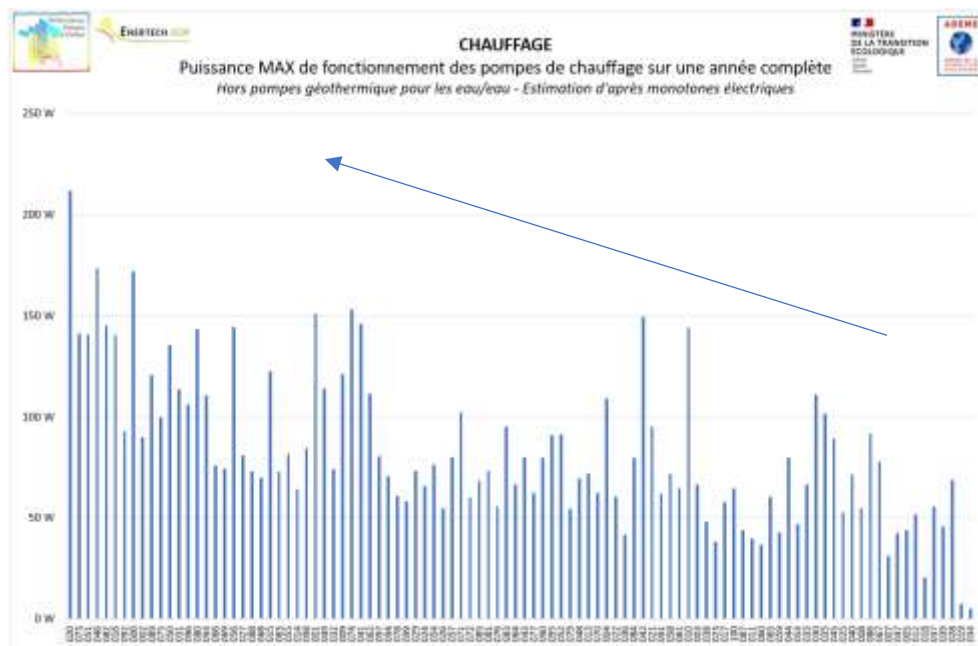


Figure 103 : Puissance maximum des circulateurs de chauffage (les logements sont triés par ordre décroissant de consommation annuelle estimée pour les circulateurs)

La corrélation est assez nette entre la consommation et la puissance maximale des pompes de chauffage. Le graphique fait état d'une **grande diversité de puissance maximum** pour les circulateurs, allant **de 5 à 200 W (rapport de 40)**. L'énergie consommée étant liée à la puissance et au temps de fonctionnement, la Figure 104 expose la durée de fonctionnement des circulateurs de chauffage, toujours en triant les logements par consommation annuelle des circulateurs décroissante.

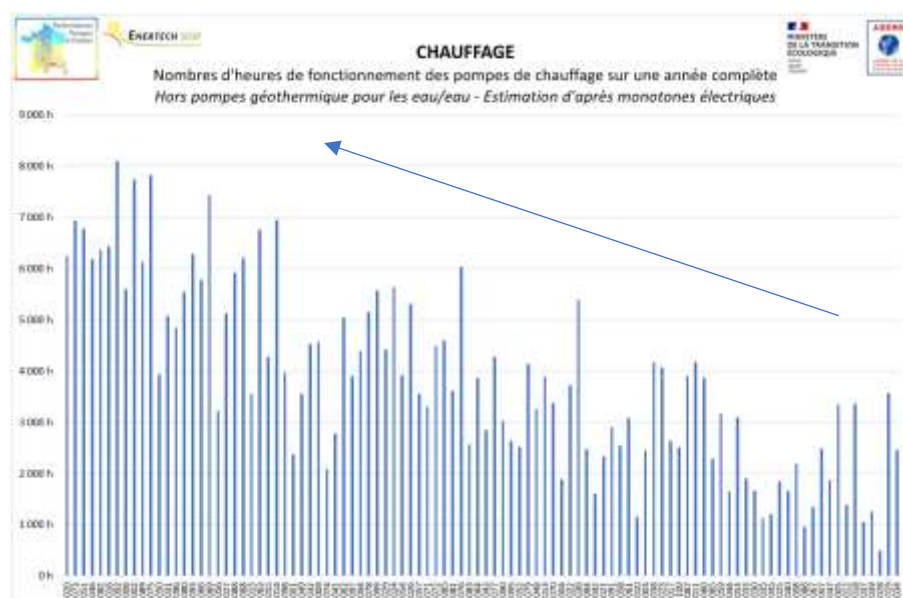


Figure 104 : Durée de fonctionnement des circulateurs de chauffage (les logements sont triés par ordre décroissant de consommation annuelle estimée pour les circulateurs)

La corrélation entre la durée de fonctionnement et la consommation des circulateurs est, elle aussi, **assez nette**. Cette Figure 104 permet de mettre en exergue des **dysfonctionnements dans certains**

logements, avec des **durées de fonctionnement des circulateurs parfois anormalement élevées** (allant jusqu'à dépasser les 7000 heures dans les pires cas).

Plusieurs corrélations de la puissance maximale des circulateurs ont été testées, et sont présentées dans la Figure 105.



Figure 105 : Corrélations de la puissance maximale des circulateurs avec le fabricant, la surface des logements et le nombre de pompes

Pas de corrélation très nette n'est observée entre la puissance maximale des circulateurs et le fabricant de la PAC (légère tendance à la hausse toutefois sur les fabricants 6 et 11). Une légère corrélation, avec une grande dispersion, existe avec la surface des logements : **plus le logement est grand, plus la puissance maximale des circulateurs est importante**. Ce qui se corrèle le mieux avec la puissance maximale des circulateurs est **le nombre de circulateurs présents sur l'installation** (graphique de droite de la Figure 105), où une tendance assez nette est observée : **plus il y a de circulateurs de chauffage dans l'installation et plus le poste est consommateur**. Le choix d'installer une bouteille de découplage plutôt qu'un ballon tampon en série n'est donc pas anodin car il multiplie le nombre de circulateurs.

Les corrélations expérimentées pour caractériser la durée de fonctionnement des circulateurs sont présentées en Figure 106. La durée de fonctionnement des circulateurs n'est pas bien corrélée avec les déperditions des logements, ni avec le facteur de dimensionnement de la PAC. Une légère corrélation est observée – assez logiquement – avec la consommation de la PAC pour le chauffage (plus le logement consomme de chauffage, plus la durée de fonctionnement des circulateurs est importante).

Aucune de ces corrélations n'étant réellement satisfaisante, on peut donc avancer la conclusion que **la durée de fonctionnement des circulateurs dépend en premier lieu du paramétrage initial de l'installateur**.

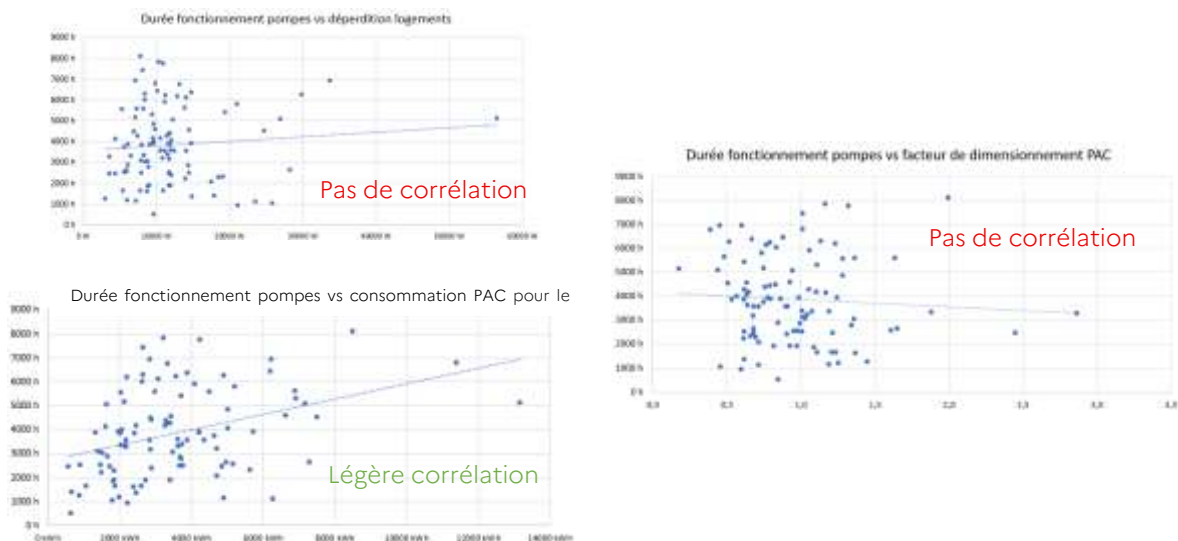


Figure 106 : Corrélations de la durée de fonctionnement des circulateurs avec les déperditions, la consommation de la PAC pour le chauffage et le facteur de dimensionnement de la PAC (puissance thermique à T°C base / déperditions)

DEBITS DE CIRCULATION

Il est essentiel lorsque nous raisonnons sur les circulateurs de lier leur fonctionnement aux débits véhiculés, qui est le service énergétique rendu par ces équipements.

La campagne de mesures s'est appliquée à mesurer les températures de départ et de retour chauffage au niveau des circuits primaires, en sortie de PAC. La différence des températures entre le départ et le retour (ΔT), qui constituent les conditions aux bornes de la PAC du côté production de chauffage, est présentée pour chaque logement dans la Figure 107.

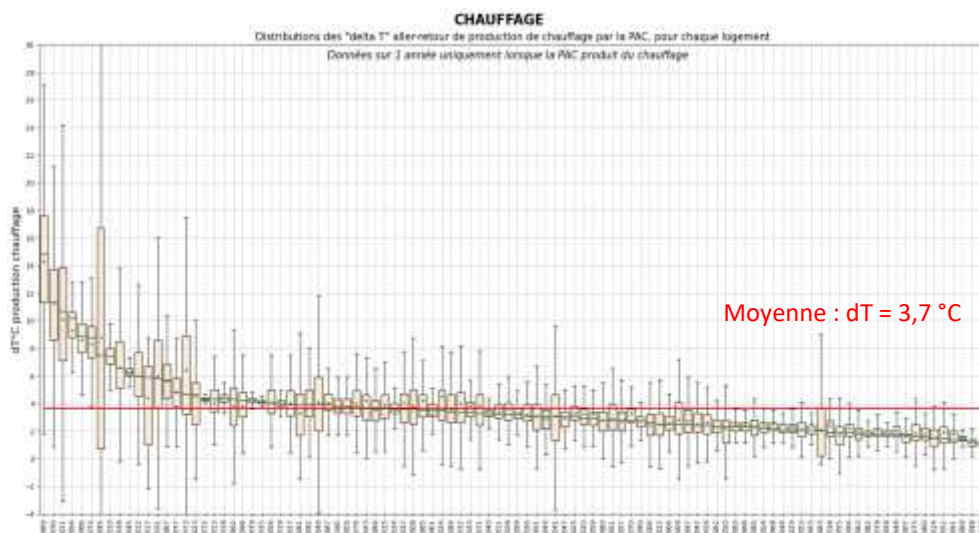


Figure 107 : Distribution des ΔT aller-retour de production de chauffage par la PAC

La moyenne du ΔT entre l'aller et le retour du circuit de production de chauffage vaut 3,7°C en moyenne, ce qui nous paraît faible. Une valeur de plus de 5°C est attendue ici (et notamment mesurée

en Allemagne, cf. Partie 3). Ces faibles écarts sont en pratique causés par le **débit du circulateur** qui, s'il est **trop important**, induit une température de retour proche de la température de départ. Au-delà du réglage et de la puissance électrique du circulateur qui pourraient, sous certaines conditions, être revus à la baisse, **le COP de la PAC est lui aussi pénalisé** puisqu'elle travaille à plus haut régime pour réchauffer une température de retour qui est plus importante que ce qu'elle pourrait être dans un cas plus idéal.

Dans près de la moitié des logements instrumentés, l'installation de chauffage est équipée d'une **bouteille de découplage**. De nombreux installateurs optent pour ce choix pour plusieurs raisons (ajout d'un volume d'eau dans l'installation – pourtant possible aussi avec un volume tampon en série –, limitation de la puissance à fournir par la pompe de la PAC, pas de modification du débit existant dans les émetteurs – donc rassurant –, etc.). Pourtant, même quand elles sont bien dimensionnées (ce qui est malheureusement rarement le cas, cf. Partie 1 §3.3.5) **les bouteilles de découplage peuvent poser en pratique de nombreux dysfonctionnements dans les installations mesurées, confirmés par les équipes techniques de certains fabricants qui sont allés sur site pour investiguer sur les veilles et les cyclages importants de certaines de leurs PAC.**

En théorie, le fonctionnement idéal d'une bouteille de découplage est d'avoir un **sur-débit au primaire de l'ordre de 10 à 15% à tout moment**, permettant d'éviter le recyclage de débit au secondaire et ainsi d'assurer que la température de départ secondaire est bien égale à la température d'arrivée du primaire. En dehors de ce point d'équilibre, les dysfonctionnements suivants peuvent apparaître :

- Un **sur-débit au primaire trop important** induit des **surconsommations inutiles du circulateur** (cela n'apporte rien), et une **température de retour vers la génération élevée** qui, comme expliqué dans le paragraphe précédent, est **défavorable au COP de la PAC et peut provoquer un phénomène de cyclage marche/arrêt.**
- Un **sur-débit au secondaire est également problématique** puisque la température de retour du circuit de chauffage, qui est froide (comme l'eau a déjà restitué sa chaleur au sein des émetteurs), remonte dans la bouteille et repart dans l'installation. Selon l'importance de ce déséquilibre de débit, il peut arriver que la température de départ au secondaire se retrouve à être de plusieurs degrés inférieure à la température de production en amont de la bouteille. A cause du recyclage parasite du retour chauffage, la température au départ demeure plus faible que la production ce qui peut **induire une sous-chauffe des espaces et de l'inconfort thermique dans le logement.** Résoudre ce problème sans traiter ce déséquilibre de débit revient à **augmenter la température de production**, ce qui **dégrade la performance de la PAC.**

D'un point de vue pratique, à la mise en service, ces réglages sont assez fins et nécessitent bien souvent plusieurs mesures de la température du réseau à plusieurs piquages de la bouteille : en pratique, il semble qu'une telle procédure n'est jamais réellement mise en œuvre dans les logements individuels.

Le fonctionnement d'une bouteille de découplage, fondamental lorsque nous auditions une installation de chauffage, est résumé sur la Figure 108.

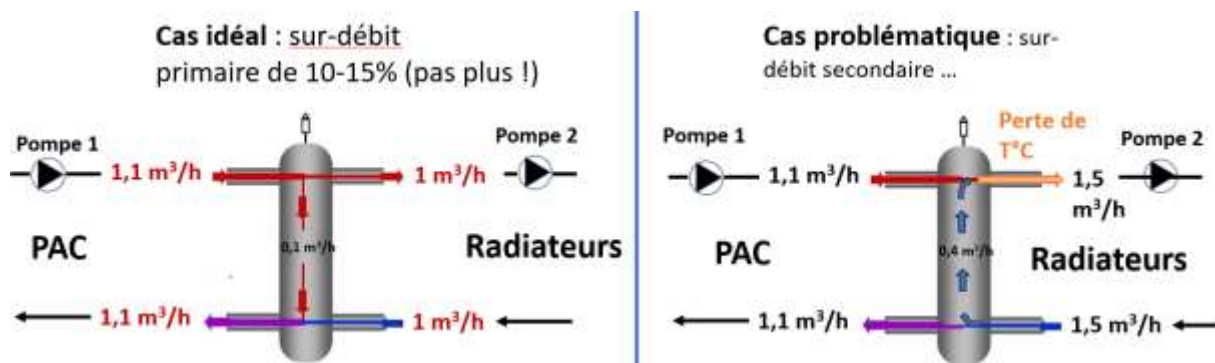


Figure 108 : Fonctionnement d'une bouteille de découplage

Dans les logements instrumentés, nous avons mesuré avec des sondes non communicantes les températures au secondaire des bouteilles de découplage. Avec les mesures aux bornes de la PAC, il nous est possible d'évaluer l'équilibre des bouteilles de notre échantillon sur la Figure 109.

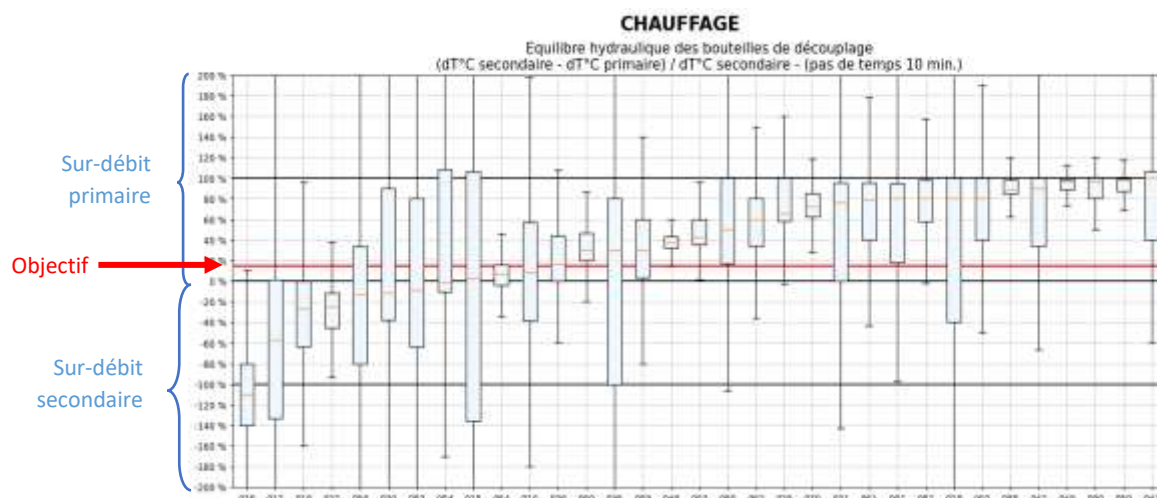


Figure 109 : Équilibre des bouteilles de découplage hydraulique de notre échantillon

Le graphique montre bien qu'en pratique **très peu de bouteilles sont équilibrées**, avec environ **1/3 des bouteilles** présentant un sur-débit au secondaire en moyenne, et **plus de la moitié un sur-débit au primaire**.

2.1.3.7.3. Conclusion sur l'étude des circulateurs

Les consommations des circulateurs ont pu être estimées grâce aux mesures électriques et semblent **trop élevées par rapport au besoin**. Elles sont notamment deux fois plus importantes qu'en chaudière murale gaz²¹.

Les débits de production du chauffage sont **trop importants**, ce qui nuit au COP (retour PAC plus chaud) et à la **consommation électrique des auxiliaires**. Le sujet du meilleur réglage des pompes lors de la mise en service des installations doit être abordé.

Les **durées de fonctionnement des pompes** sont également parfois mal maîtrisées (circulateurs permanents, temporisations trop longues).

Le **nombre de pompes** est directement impactant sur la consommation des auxiliaires. Une bonne pratique semble être **d'éviter les configurations avec une bouteille de découplage lorsqu'il n'y a qu'un seul réseau de chauffage**, ce qui représente dans notre échantillon 30 cas sur 100.

L'**équilibre hydraulique des bouteilles de découplage (posées dans près de la moitié des logements) pose enfin des problèmes de fonctionnement récurrents**. Ces bouteilles sont souvent trop petites d'après certains fabricants (règle des 3D non respectée) ce qui crée des couplages perturbateurs. L'équilibre des débits primaire/secondaire est rarement respecté ce qui peut être la cause de cyclages excessifs ou au contraire de perte de température au secondaire. Nous recommandons a minima d'éviter la mise en place des bouteilles en cas de présence d'un seul réseau de distribution (cf. remarque précédente) et de mettre au travail les installateurs et fabricants sur ce sujet.

²¹ Consommation des chaudières dans Panel Elecdom année 1 : 202 kWhél/an, ce qui implique une consommation des circulateurs de l'ordre de 100-130 kWhél/an en enlevant une puissance de veille de l'ordre de 10W.

2.1.4. Recherche de corrélation du SCOP chauffage mesuré

2.1.4.1. Corrélations du premier ordre

Le SCOP de Carnot, représentant l'efficacité maximale théorique atteignable par une PAC fonctionnant dans des conditions similaires de loi d'eau et de température à la source froide, permet une bonne corrélation, à condition de le calculer *a minima* au pas de temps horaire (Figure 110).

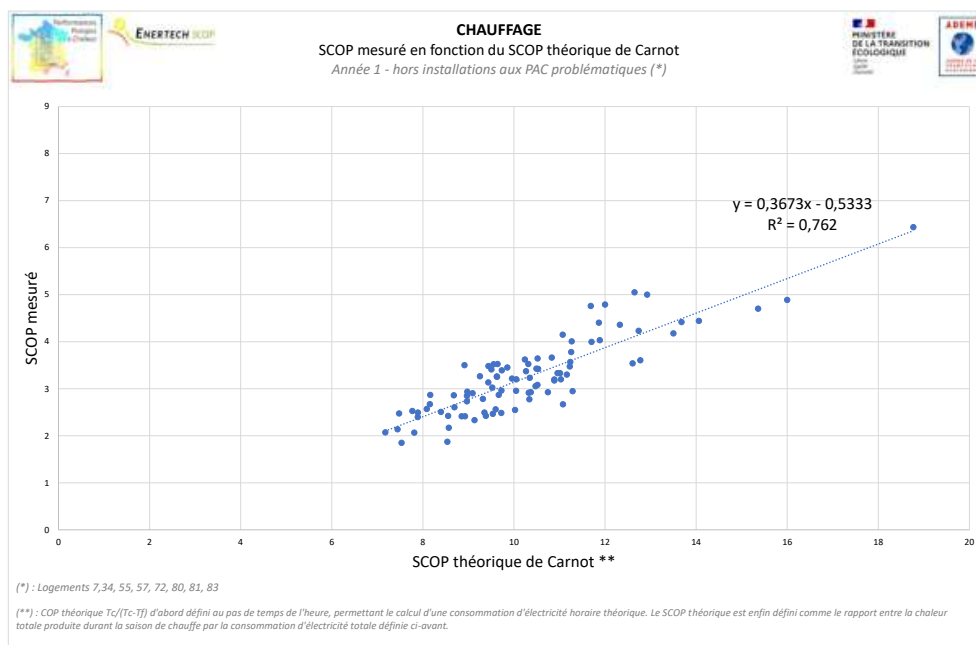


Figure 110 : Corrélation entre le SCOP mesuré et le SCOP théorique de Carnot

Les dispersions autour de la loi intègrent les pincements des échangeurs, la part des auxiliaires, les pertes thermiques des circuits, le rendement du compresseur, etc. La régression linéaire de cette courbe confirme que le facteur *f* d'efficacité par rapport à Carnot n'est pas constant, mais augmente en réalité lorsque le SCOP et le SCOP théoriques augmentent. C'est d'ailleurs bien ce qu'on voit sur le graphique des résultats généraux de la Figure 76, où le facteur d'efficacité augmente tendancielllement avec la valeur des SCOP. Les températures de production de chauffage et de source froide ont donc malgré tout une certaine influence sur le facteur d'efficacité de Carnot.

Le SCOP de Carnot est calculé à partir de la température de la source froide et de la température de production du chauffage. La Figure 111 montre que c'est l'influence de la température de production qui est plus importante dans le SCOP de Carnot que celle de la source froide.

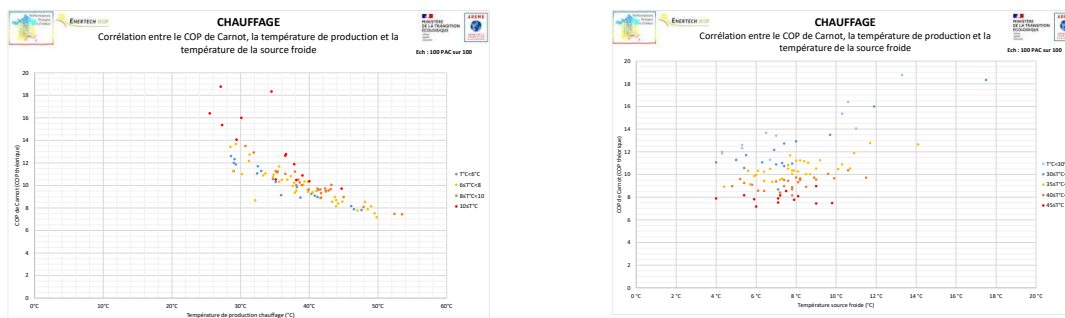


Figure 111 : Corrélation du SCOP de Carnot avec la température de production du chauffage et la température de la source froide.

Ainsi, la Figure 112 montre que **la loi d'eau** (moyenne de la température de production du chauffage) **est le premier facteur d'influence robuste sur le SCOP chauffage mesuré**. La température de la source froide a aussi une influence, mais la corrélation présentée sur la Figure 113 est moins prononcée.

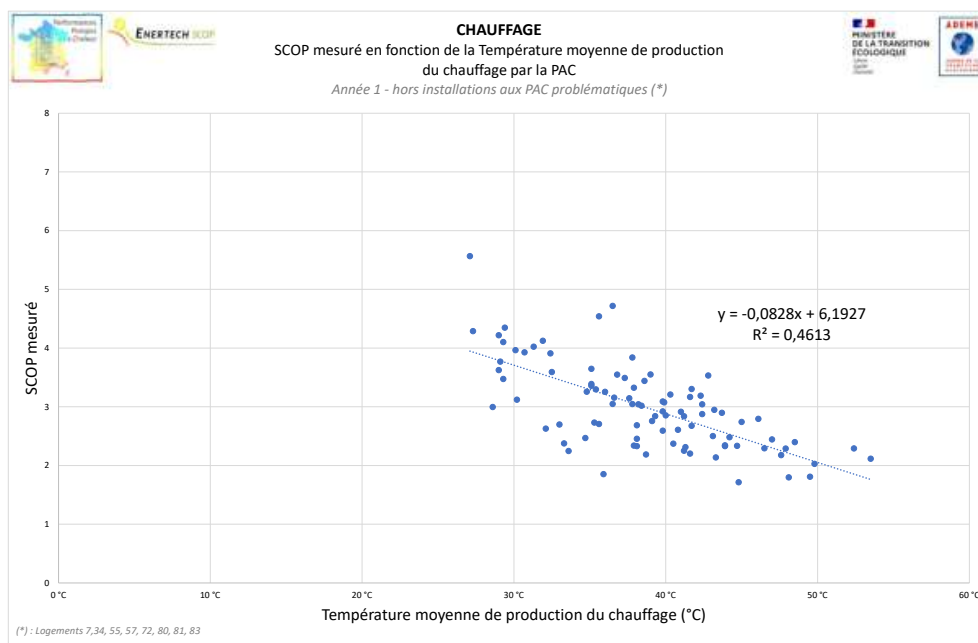


Figure 112 : Corrélation entre le SCOP chauffage mesuré et la température de production du chauffage

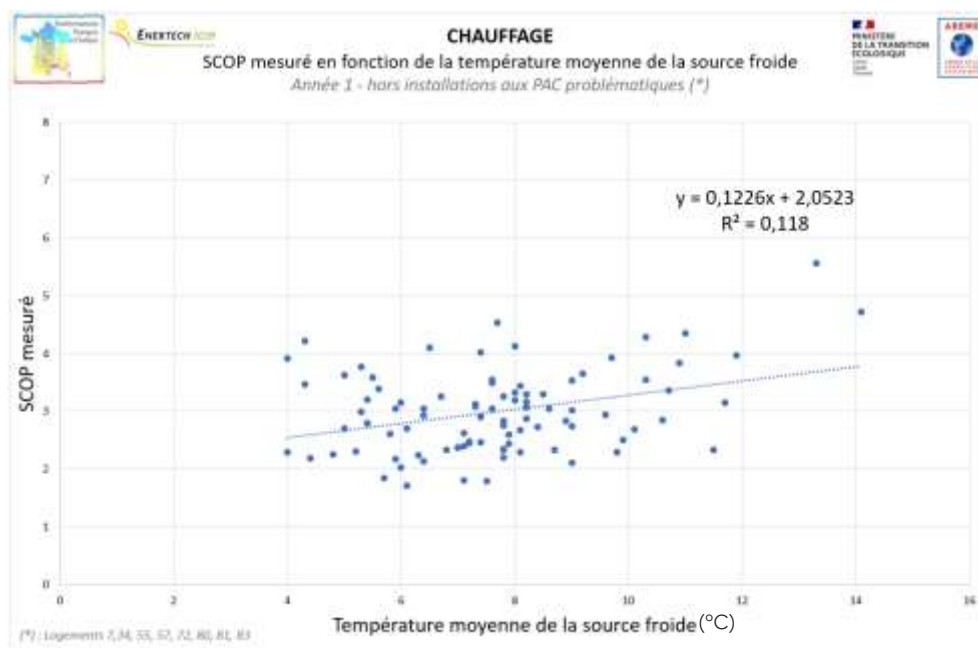


Figure 113 : Corrélation entre le SCOP chauffage mesuré et la température de la source froide

Ces corrélations corroborent l'importance de la température de production du chauffage et de la température de la source froide dans le SCOP d'une PAC. Les analyses du §2.1.3.2 ouvrent la voie à des **marges d'optimisation du réglage de la loi d'eau**. Il semblerait que **la détermination et le réglage des lois d'eau dans les logements individuels ne soient pas maîtrisés aujourd'hui par tous les installateurs lors de la mise en service**. En pratique, la loi d'eau dépend des émetteurs installés dans chaque pièce, de leur loi d'émission de chaleur en fonction du régime de température, de l'équilibrage des réseaux hydrauliques et des déperditions de chaleur à y vaincre. Il ne semble pas réaliste d'imaginer

systématiquement des études poussées à chaque installation de PAC. Outre la question du corps de métier qui en serait responsable, réaliser un calcul détaillé serait très onéreux et en pratique très compliqué à mener à terme tant les inconnues paraissent nombreuses (débit réel traversant chaque émetteur, fiche technique des puissances d'émission pas toujours disponibles, etc.).

C'est pourquoi il semble plus **réaliste d'envisager un réglage « terrain » de la loi d'eau, prenant en compte l'état réel de l'installation de chauffage**. Des échanges avec les fabricants et des référents techniques nationaux sur les PAC nous ont conduit à réfléchir à la possibilité que la loi d'eau soit déterminée par un programme automatique qui serait implémenté directement dans les PAC. **Cette piste de travail pourrait être approfondie.**

Concernant la température de la source froide pour les PAC air/eau, **il est préférable de concentrer les périodes de production du chauffage en journée**, là où la température extérieure est plus clémente et les COP meilleurs. La coutume est de programmer un réduct de chauffage entre 22h00 et 6h00, ce qui n'est pas optimal pour les PAC puisque cela engendre un pic de puissance de relance à 6h00, qui se trouve être aussi la période de la journée où les températures extérieures sont les plus froides. La reprogrammation du chauffage en journée (en réduisant le chauffage de 3h00 à 11h00 par exemple) permettrait de concentrer l'appel de puissance à 11h00, qui est une période beaucoup plus favorable pour l'efficacité de la PAC. De surcroît, si elle est bien paramétrée, la résistance d'appoint serait moins sollicitée ce qui appuie encore la performance de production du chauffage en décalant ces horaires. Enfin cette plage horaire de fonctionnement serait plus favorable à l'autoconsommation en cas de présence d'une installation photovoltaïque et potentiellement concomitante avec les nouvelles plages d'heures pleines / heures creuses à venir annoncées en journée.

Dans certaines installations, la configuration d'installation de l'unité extérieure engendre des **recyclages d'air** (voir §3.3.5). Très concrètement, en hiver, lors du chauffage, les ventilateurs de l'unité extérieure tournent pour évacuer la fraîcheur de l'évaporateur dont l'objectif est de capter les calories de l'air extérieur pour le restituer au condenseur. Si le flux d'air autour de l'unité extérieure est perturbé, par exemple par un obstacle ou par une installation dans un espace confiné, l'air dans lequel l'unité extérieure va chercher à puiser des calories va se rafraîchir. Plus la température extérieure est basse, moins le SCOP chauffage est performant. Ainsi, **le recyclage d'air induit une baisse de performance très significative avec une baisse potentiel de la température de source froide de plusieurs degrés**, ce qui se rapproche fictivement d'un changement de zone climatique. Il nous semble qu'une **sensibilisation des installateurs et des usagers serait utile sur cet aspect, l'intégration des unités extérieures étant un enjeu majeur lié à la multiplication des installations de pompes à chaleur sur air extérieur** (cf. Partie 1 §3.3.5).

2.1.4.2. Corrélations du second ordre

De nombreuses autres corrélations ont été testées pour tenter de corrélérer l'efficacité par rapport à Carnot (f), souvent sans résultat flagrant.

La Figure 114 montre l'influence visible du nombre total de cycles journaliers de la PAC sur l'efficacité par rapport à Carnot : **plus la PAC cycle, plus l'efficacité par rapport à Carnot f se dégrade**. A ce sujet, **il nous semblerait primordial de proposer un menu dans les PAC permettant de consulter l'historique du nombre de cycles de démarrage/arrêt par jour**. En cas de valeur haute (par exemple plus de 10), l'installateur ou le mainteneur pourrait être invité à consulter **un menu dédié lui proposant différents leviers de correction** (paramètres à modifier, abaissement de loi d'eau, etc.).

La Figure 115 montre quant à elle l'influence visible du SCOP fabricant sur l'efficacité par rapport à Carnot.

Le graphique de la Figure 116 montre que **plus le SCOP chauffage mesuré est élevé, plus l'efficacité de Carnot est performante**. Nous retrouvons ici le constat que **les SCOP les plus performants sont obtenus aussi grâce à des efficacités de Carnot supérieures**. Cette influence montre qu'il reste un lien de corrélation résiduel entre l'efficacité f et les températures des sources chaudes et froides, alors que nous pensions avoir adimensionné le raisonnement à ces grandeurs avec le COP de Carnot. **Les points d'attention évoqués dans les paragraphes précédents contribueront à l'amélioration de ce facteur de Carnot** : le recyclage d'air au niveau de l'unité extérieure, les programmations horaires, le réglage de

la loi d'eau et de la résistance d'appoint, l'équilibre des bouteilles de découplage, auxquels nous pouvons ajouter le calorifugeage des installations. Nous proposons aussi de réfléchir à **l'ajout systématique, lors de la visite de maintenance annuelle, d'une composante « performance énergétique » pour affiner les réglages et maintenir dans le temps la performance** : vérifier les compteurs de cycles, mesurer la veille (pour la limiter en période estivale par disjonction par exemple pour une PAC simple service, ou identifier un défaut de pilotage de la résistance de carter), ajuster la loi d'eau, proposer un ralenti, abaisser la consigne ambiante, etc.

La Figure 117 confirme la dépendance de l'efficacité de Carnot f à la température de production (d'où la corrélation précédente avec le SCOP chauffage mesuré).

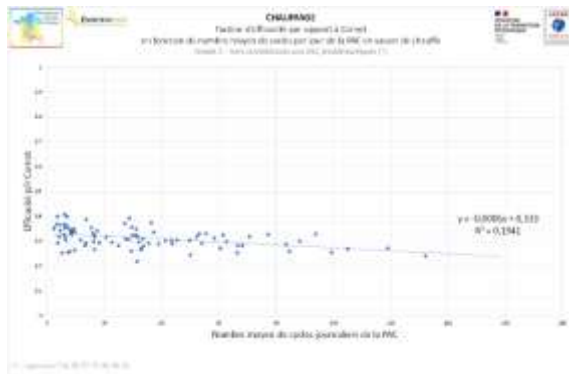


Figure 114 : Facteur d'efficacité par rapport à Carnot en fonction du nombre moyen de cycles par jour de la PAC en saison de chauffe

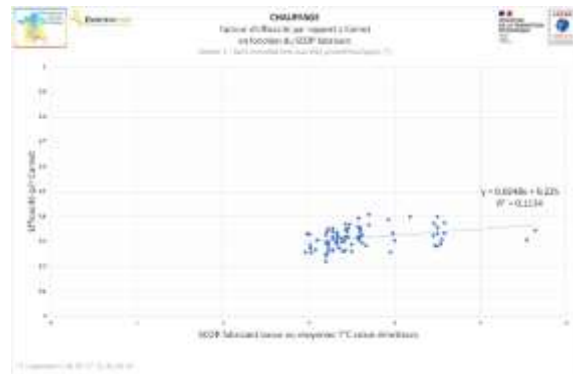


Figure 115 : Facteur d'efficacité par rapport à Carnot en fonction du SCOP fabricant

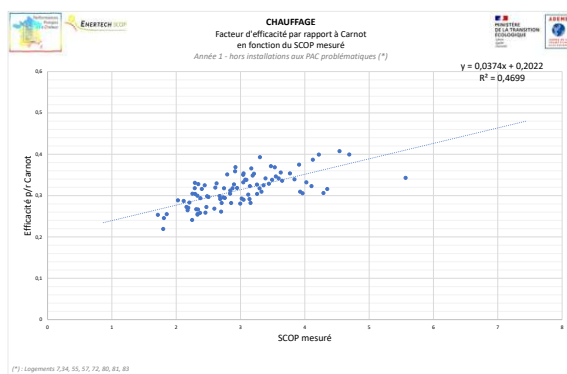


Figure 116 : Facteur d'efficacité par rapport à Carnot en fonction du SCOP mesuré



Figure 117 : Facteur d'efficacité par rapport à Carnot en fonction de la température de production de chauffe

Bien que les corrélations ci-dessus soient moins évidentes que pour le SCOP, elles confirment l'importance d'une loi d'eau la plus basse possible et d'un faible nombre de cycles marche/arrêt de la PAC pour un fonctionnement performant de la machine.

2.1.4.3. Corrélation avec la zone climatique, le type d'émetteur, le niveau d'isolation

Nous présentons ici des corrélations macroscopiques du SCOP mesuré : au type de climat (H1, H2, H3), au type d'émetteur et au niveau d'isolation des logements.

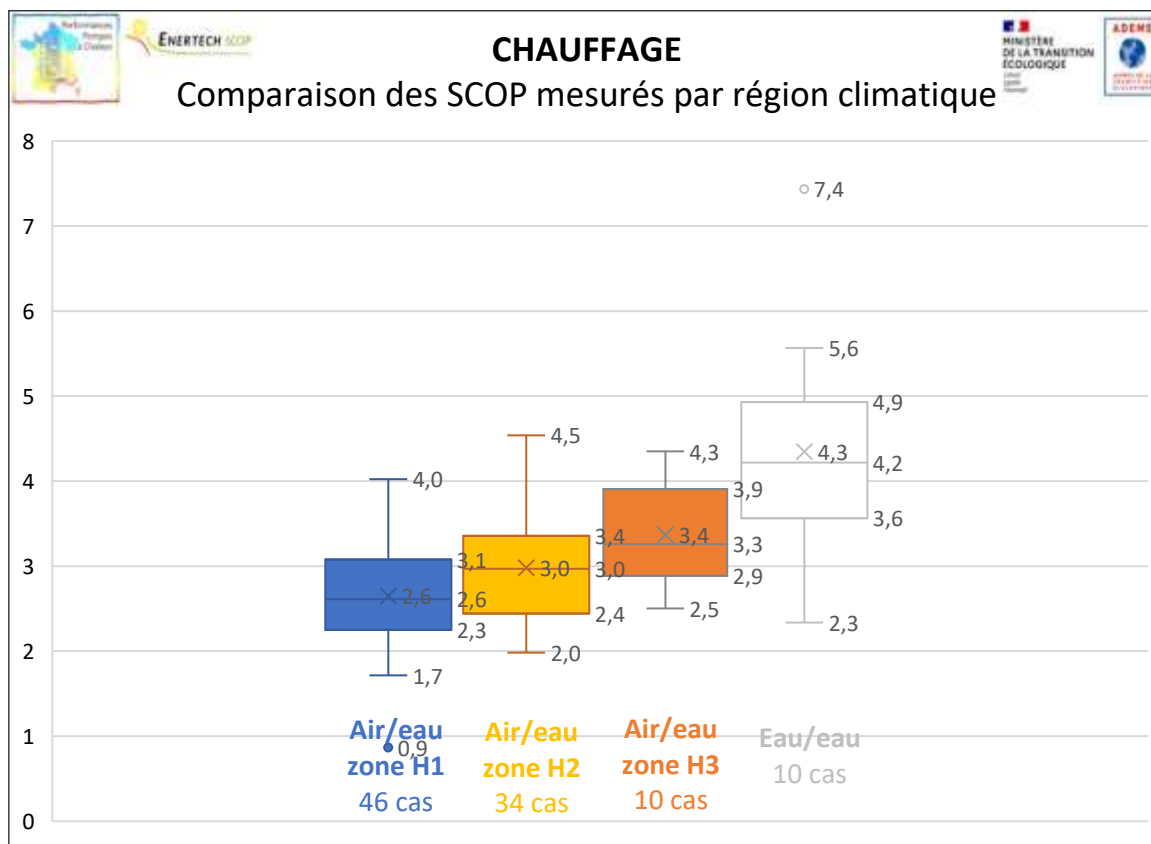


Figure 118 : Comparaison des SCOP mesurés par région climatique

La Figure 118 montre une corrélation franche entre le SCOP mesuré et la région climatique pour les PAC air/eau. Le gain de performance entre deux régions climatiques voisines est de +15% ou +0,4 point de SCOP, ce qui est plutôt important (presque 1 point de SCOP de différence entre la zone climatique la plus froide et la plus clémente).

Au regard des températures moyennes mesurées dans chaque zone climatique (§2.1.3.3), on peut avancer la conclusion selon laquelle un hiver plus rigoureux que celui vécu pendant la campagne (§1.2) comme celui de 2021, serait susceptible de dégrader les performances observées de 15 à 20%, toutes choses égales par ailleurs. Ce point pourra être confirmé avec l'observatoire sur 4 ans mis en place sur 80 PAC de l'échantillon.

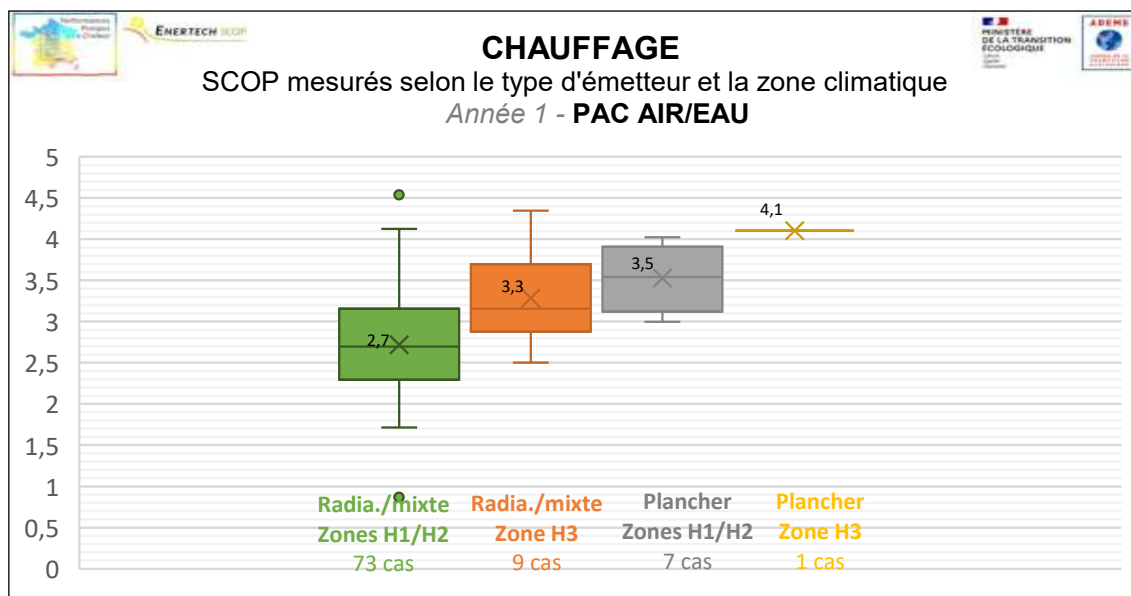


Figure 119 : SCOP mesurés selon le type d'émetteur et la zone climatique – PAC air/eau

Au sein de chaque zone climatique, le gain de performance entre des émetteurs basse température (plancher) et moyenne/haute température (radiateurs²² et mixte) est d'environ 0,5 point de SCOP. Ce résultat est cohérent avec celui observé au §2.1.3.2 où nous observons un écart de 10°C en moyenne sur la température de départ entre les logements équipés exclusivement de planchers-chauffants et les autres cas, et le lien de corrélation observé au §2.1.4.1.

Le même graphique est présenté sur la Figure 120 pour les PAC eau/eau à titre indicatif (le nombre de cas étant très faible). Sur ces PAC, d'autres aspects sont prépondérants sur le type d'émetteur dans l'explication de la performance énergétique (notamment la source géothermique) : l'écart de 1,5 point de COP entre les logements équipés de planchers seuls et les autres n'est pas imputable uniquement au type d'émetteur.

²² Les cas ventilo-convecteurs et batterie CTA sont assimilés ici à des radiateurs du fait de leur régime de température.

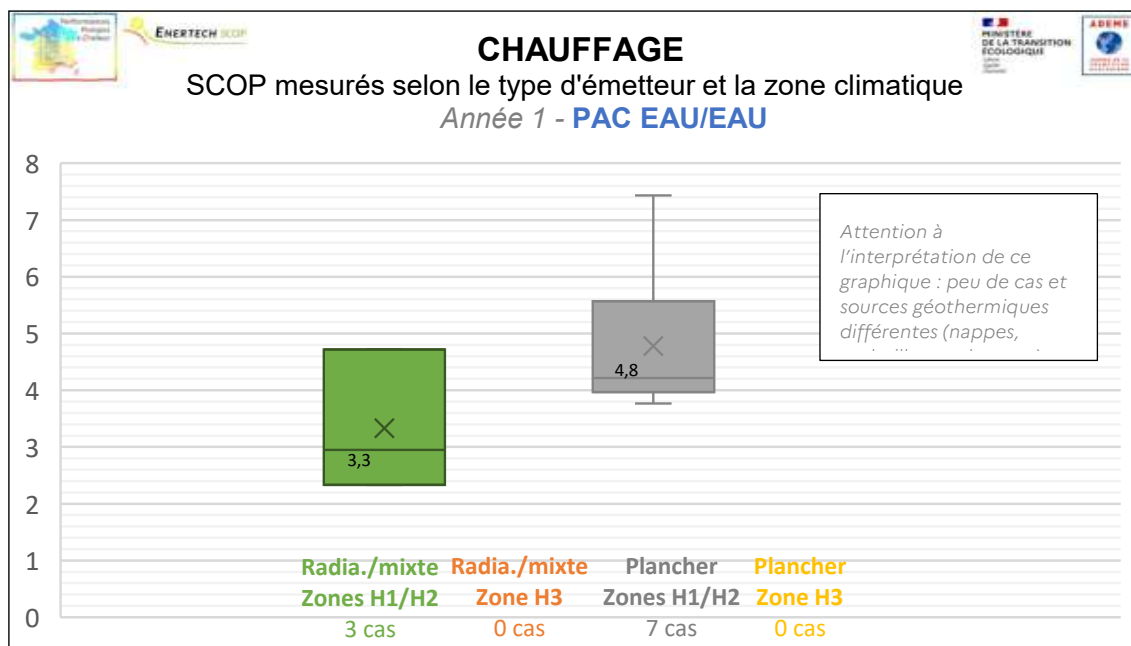


Figure 120 : SCOP mesurés selon le type d'émetteur et la zone climatique – PAC eau/eau

La Figure 121 montre une absence de corrélation entre le niveau d'isolation des logements et la performance des pompes à chaleur. Ce résultat est cohérent avec les conclusions du §2.1.3.2 montrant l'absence de corrélation entre la température de production du chauffage et la déperdition surfacique des logements. En effet, une marge d'optimisation du réglage de la loi d'eau existe dans de nombreuses habitations, en particulier dans les logements les mieux isolés où le surdimensionnement des émetteurs est le plus important. **Il ne faut donc pas lire sur la Figure 121 qu'une meilleure isolation ne permet pas d'atteindre de meilleures performances pour une PAC, mais plutôt que les problèmes de mise en œuvre des installations et notamment le mauvais réglage des lois d'eau, ne permettent pas de tirer pleinement profit des performances de l'enveloppe.**

Rappelons tout de même qu'une maison plus isolée permet non seulement une réduction de la puissance de PAC installée (donc un coût de fourniture inférieur) mais surtout une diminution claire du besoin de chauffage (§2.2.2) donc de la facture.

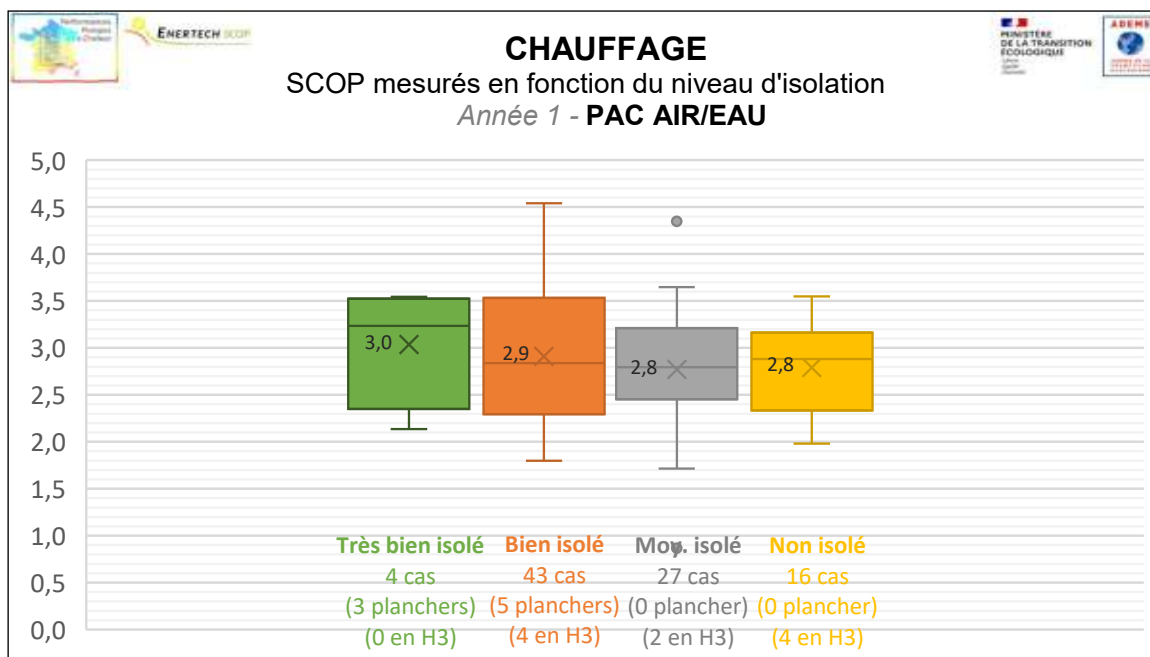


Figure 121 : SCOP mesurés en fonction du niveau d'isolation – PAC air/eau

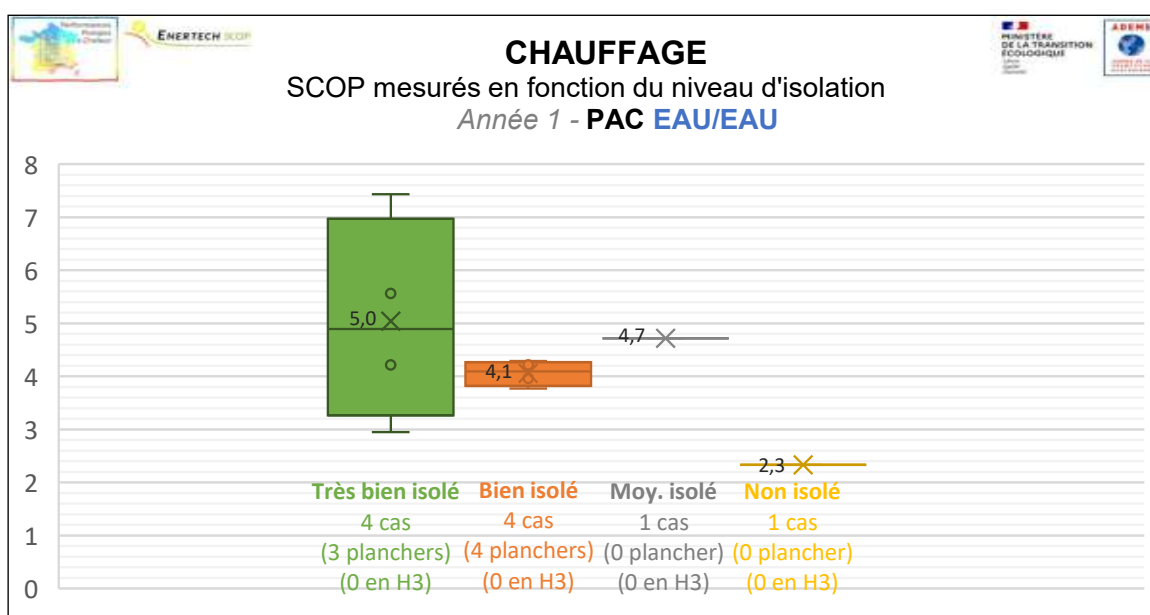


Figure 122 : SCOP mesurés en fonction du niveau d'isolation - PAC eau/eau

2.1.4.4. Focus sur les PAC monobloc au R290

Les PAC monobloc sont réputées plus faciles à installer : le circuit frigorifique étant interne à l'unité extérieure, il n'y a pas de ligne frigorifique à installer entre l'unité intérieure et extérieure, comme c'est le cas pour les PAC bi-bloc. Le travail peut donc être effectué par un chauffagiste non frigoriste.

Dans notre échantillon, les performances des PAC air/eau monoblocs (SCOP moyen 3,1 – 22 unités) sont assez proches de celles des PAC air/eau bi-blocs (SCOP moyen 2,8 – 68 unités).

En analysant plus en détail les PAC monoblocs, il apparaît que les 9 unités équipées du fluide R290 (propane) présentent une performance significativement meilleure que les autres, comme le présente la Figure 123. D'après nos échanges avec les fabricants, il s'agirait d'un fluide qui présente des

caractéristiques physiques intrinsèques plus performantes que les autres fluides frigorigènes du marché. Dans notre échantillon, les PAC au R290 sont issues de 2 fabricants différents, dont un est très majoritairement représenté.

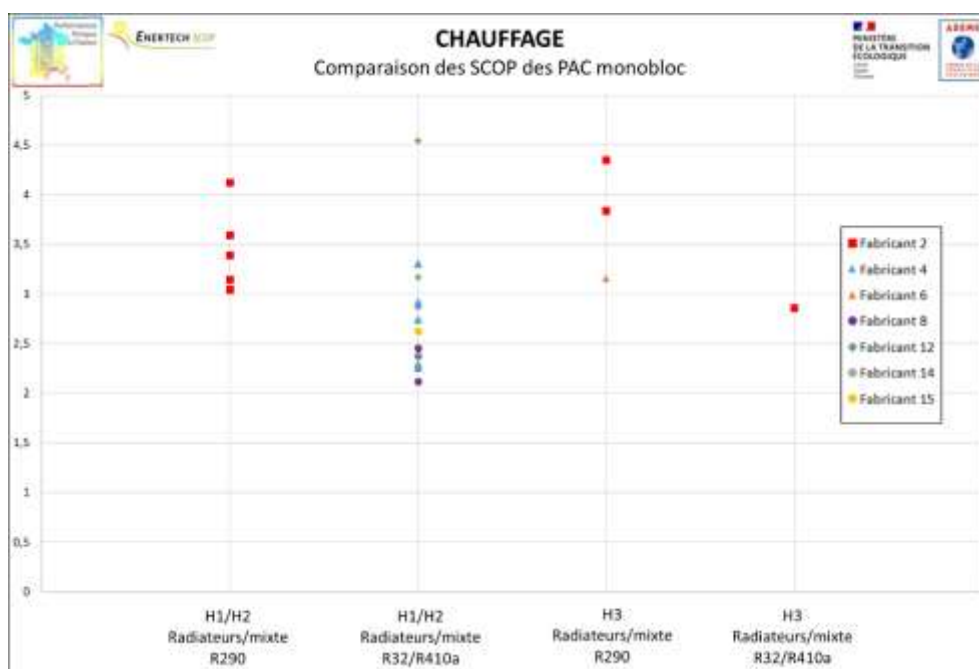


Figure 123 : Comparaison des PAC monobloc

Si l'on souhaite « s'affranchir » des conditions météo et des lois d'eau, on peut évaluer le gain lié à l'utilisation de ce fluide avec l'efficacité de Carnot.

Les mesures montrent une efficacité de Carnot moyenne de 0,34 pour ces 9 PAC air/eau au R290 contre 0,30 pour les 81 PAC air/eau utilisant d'autres fluides. Ceci représente un avantage net de 13% sur le COP « toutes choses égales par ailleurs ».

Rappelons que le GWP du R290 est par ailleurs extrêmement faible (GWP=3), ce qui en fait un des fluides les plus vertueux du marché.

Ce fluide apparaît donc intéressant à tous les niveaux, tant pour la filière et les particuliers que pour l'environnement. Il pourrait être opportun que le dispositif d'aides actuel appuie son développement.

2.2. Besoins de chaleur et consommations du chauffage

2.2.1. Températures ambiantes mesurées

Avant de présenter les besoins et consommations de chauffage, il est intéressant de regarder les températures ambiantes.

La Figure 124 présente la température ambiante moyenne dans le séjour de chaque logement sur les mois de décembre, janvier et février ainsi que la différence entre la température moyenne mesurée dans le séjour à 22h et celle à 7h sur cette période hivernale.

La moyenne des températures ambiantes dans les séjours s'élève à 19,9°C à l'échelle de l'échantillon. Cette valeur est classique en maison individuelle et ne dénote pas d'un « effet rebond » particulier lié à l'installation des PAC.

A noter l'absence d'écart significatif entre les logements équipés de PAC eau/eau (19,6°C) et ceux équipés de PAC air/eau (19,9°C).

Une variabilité importante des températures ambiantes est toutefois observée entre les logements, puisque la température moyenne la plus faible observée est de 16,8°C (logement peu occupé) et le maximum de 27,4°C (séjour équipé d'un insert utilisé en permanence) !

Des réduits nocturnes sont programmés sur 23 PAC de l'échantillon (vérifiés par les appels de puissance électriques des PAC). La température moyenne à 22h est en moyenne 0,45°C plus élevée qu'à 7 heures sur l'ensemble de l'échantillon. Cet écart vaut 0,81°C pour les logements avec réduit de chauffage et 0,34°C pour ceux qui n'en ont pas (voir Figure 125). Un réduit de nuit est donc à coup sûr bénéfique pour diminuer le besoin de chauffage du logement.

La présence d'un appoint de chauffage *significatif* (c'est-à-dire contribuant à plus de 10% du besoin de chauffage) n'implique pas une différence importante de la température ambiante mesurée dans le salon.

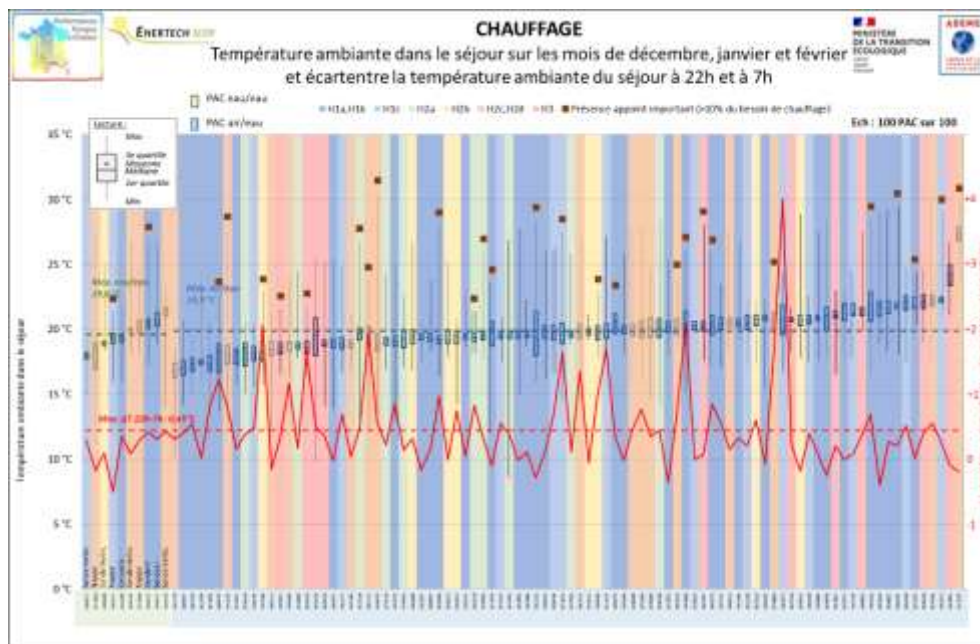


Figure 124 : Température ambiante moyenne dans le séjour sur les mois d'hiver et chute de température nocturne entre 22h et 7h

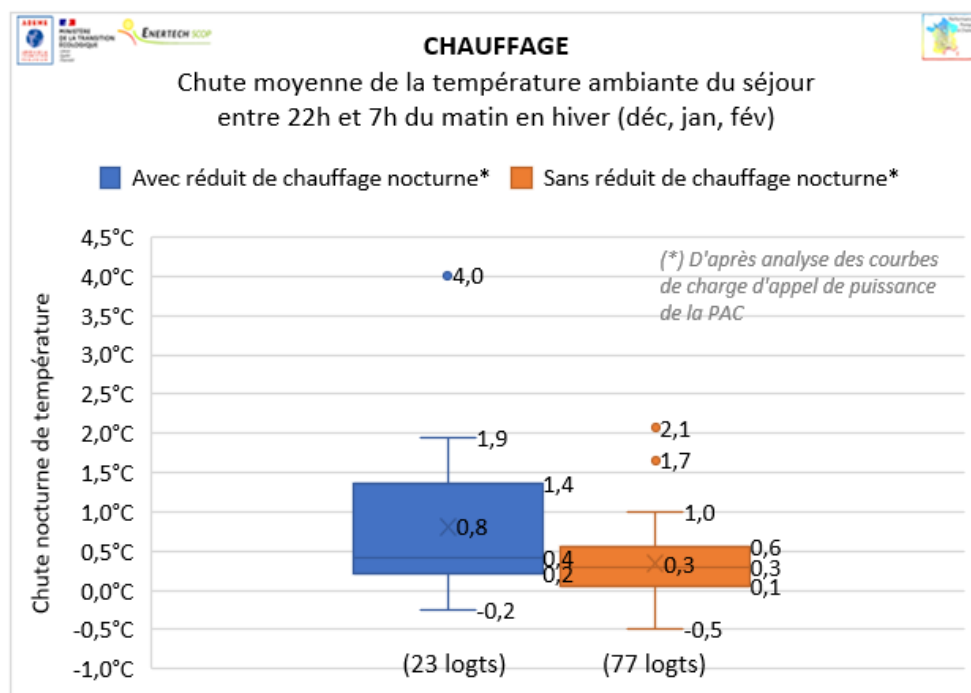


Figure 125 : Chute nocturne de la température ambiante dans les séjours des logements en hiver

2.2.2. Besoins de chaleur pour le chauffage

La campagne réalisée permet d'avoir une mesure du besoin de chaleur pour le chauffage dans 100 logements français. En complément des mesures de la chaleur fournie par la PAC, nous avons aussi recueilli les consommations des appoints de chauffage autres, en particulier le bois consommé dans les poêles à pellets, à bûches ou dans les cheminées. Les quantités de bois sont basées sur les déclarations des participants.

La Figure 127 présente la chaleur utile totale absorbée par les logements pour le chauffage. **Le besoin de chaleur des logements de l'échantillon incluant les appoints s'élève à 12 252 kWh_{ut}/an en moyenne.** La chaleur utile fournie en moyenne par la PAC pour le chauffage s'élève à 11 008 kWh_{ut}/an. Ce graphique montre l'impact non négligeable des appoints, en particulier au bois, qui équipent près d'un logement sur deux, et qui représentent près de 20% de la chaleur utile totale absorbée par les logements avec appoint bois.

Pouvoir calorifique bois bûches	2000 kWh/stere
Pouvoir calorifique pellet	73,5 kWh/sac
Pouvoir calorifique bouteille butane	123 kWh/bouteille
Rdt bûches cheminée	10%
Rendement poele bûches	65%
Rendement poele pellet	75%
Rendement gaz	80%

Figure 126 : Hypothèses de calcul utilisées pour évaluer les consommations des appoints

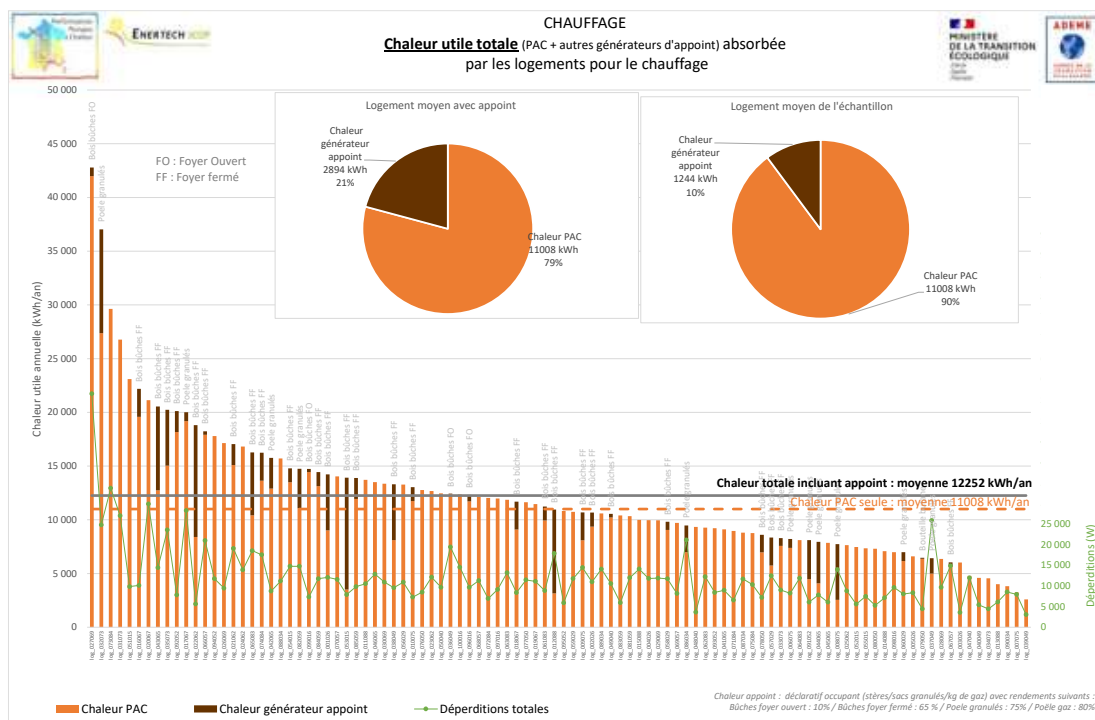


Figure 127 : Chaleur utile totale (PAC + autres générateurs d'appoint) absorbée par les logements pour le chauffage

La chaleur utile surfacique totale absorbée par les logements pour le chauffage est présentée sur la Figure 128. Ce besoin de chaleur surfacique s'élève à $86 \text{ kWh}_{\text{ut}}/\text{m}^2.\text{an}$ en moyenne en incluant les générateurs d'appoint, et $77 \text{ kWh}_{\text{ut}}/\text{m}^2.\text{an}$ pour la PAC seule. Nous estimons que ces chiffres peuvent être considérés comme une fourchette plutôt haute de la moyenne des logements français étant donné que notre échantillon n'est composé que de maisons individuelles, sans aucune maison neuve. Les déperditions surfaciques, figurant en vert sur la Figure 128, se corrélaient assez mal avec le besoin de chaleur surfacique.

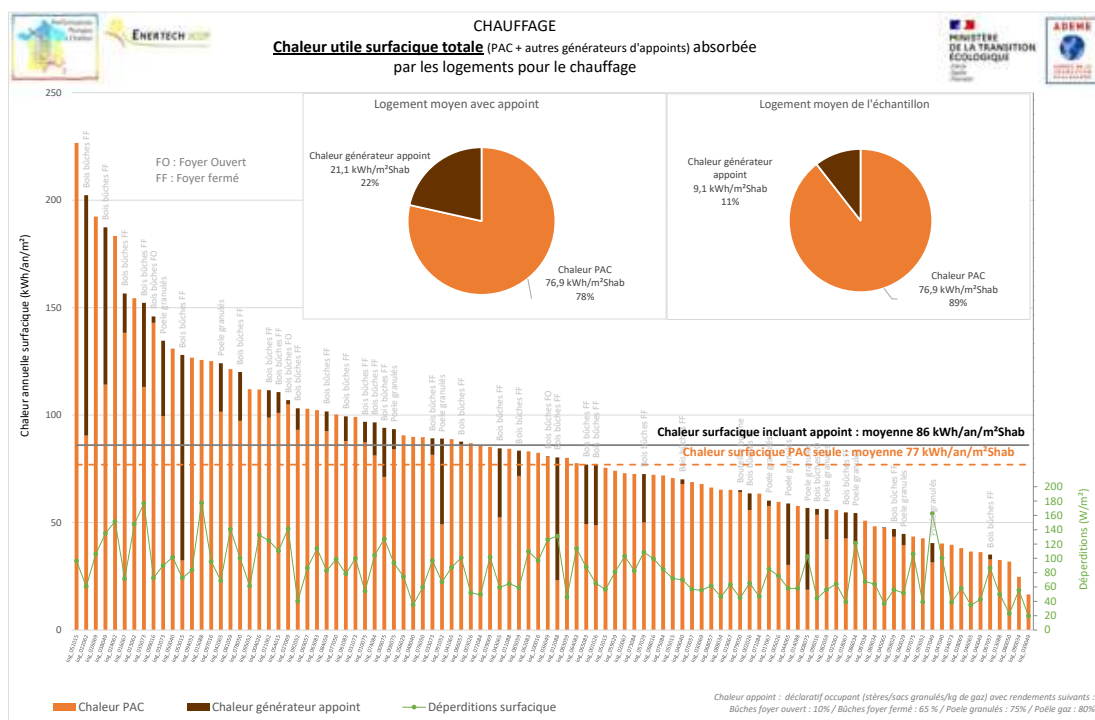


Figure 128 : Chaleur utile surfacique totale (PAC + autres générateurs d'appoint) absorbée par les logements pour le chauffage

Le modèle le plus abouti que nous avons trouvé pour expliquer le besoin de chauffage est présenté sur la Figure 129. Il évalue ce besoin à partir de la surface habitable, de la déperdition calculée et du DJU météorologique corrigé de l'ambiance mesurée. Ce modèle est plutôt bon en moyenne, mais présente des dispersions d'un facteur 2 comme cela est présenté sur le diagramme moustache adjacent au graphique.

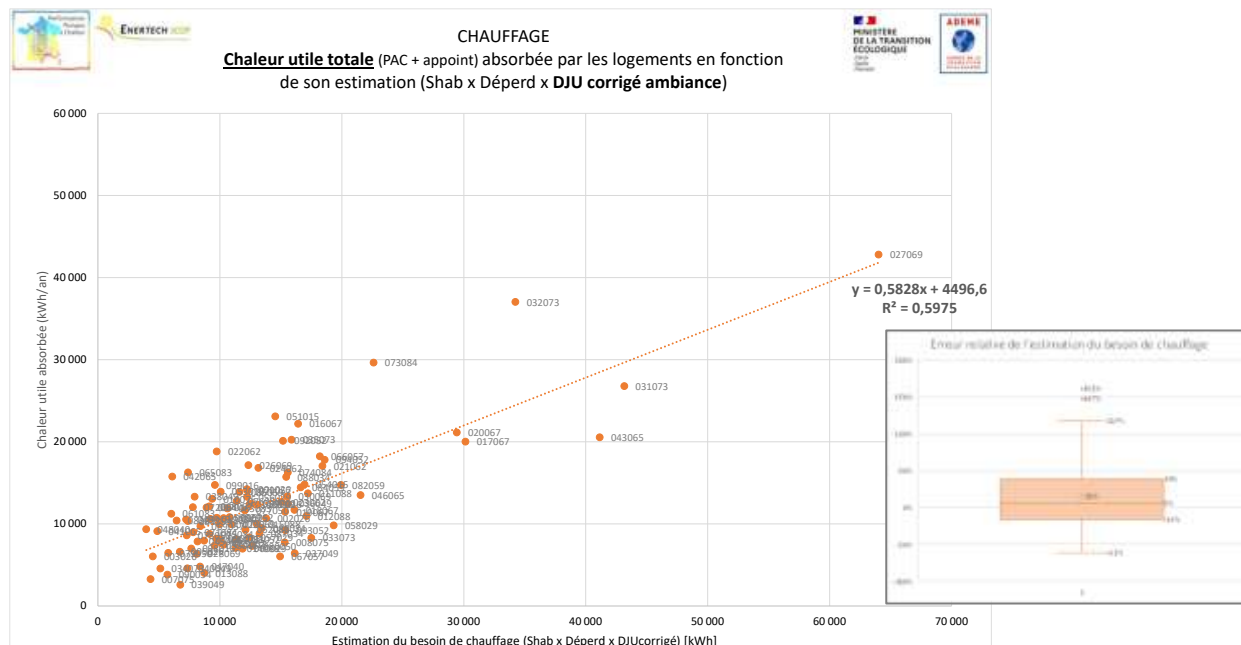


Figure 129 : Modèle d'estimation du besoin de chauffage

2.2.3. Consommations d'électricité pour le chauffage

2.2.3.1. Présentation des résultats

La Figure 130 ci-dessous présente la consommation d'électricité consommée par les PAC pour le chauffage. La moyenne de cette consommation s'élève à 3 861 kWh_e/an sur notre échantillon, avec un rapport de 1 à 22 entre la PAC la moins consommatrice (613 kWh_e/an) et la plus consommatrice (13 658 kWh_e/an). La consommation surfacique d'électricité consommée par les PAC pour le chauffage s'élève à 28 kWh_e/m².an en moyenne. Une grande disparité est encore une fois observée avec un rapport 21 entre le minimum (5,3 kWh_e/m².an) et le maximum (112 kWh_e/m².an).

Les explications de ces consommations sont directement liées à celles exprimées sur le besoin de chauffage (§2.2.2) et sur le SCOP de production (§2.1).

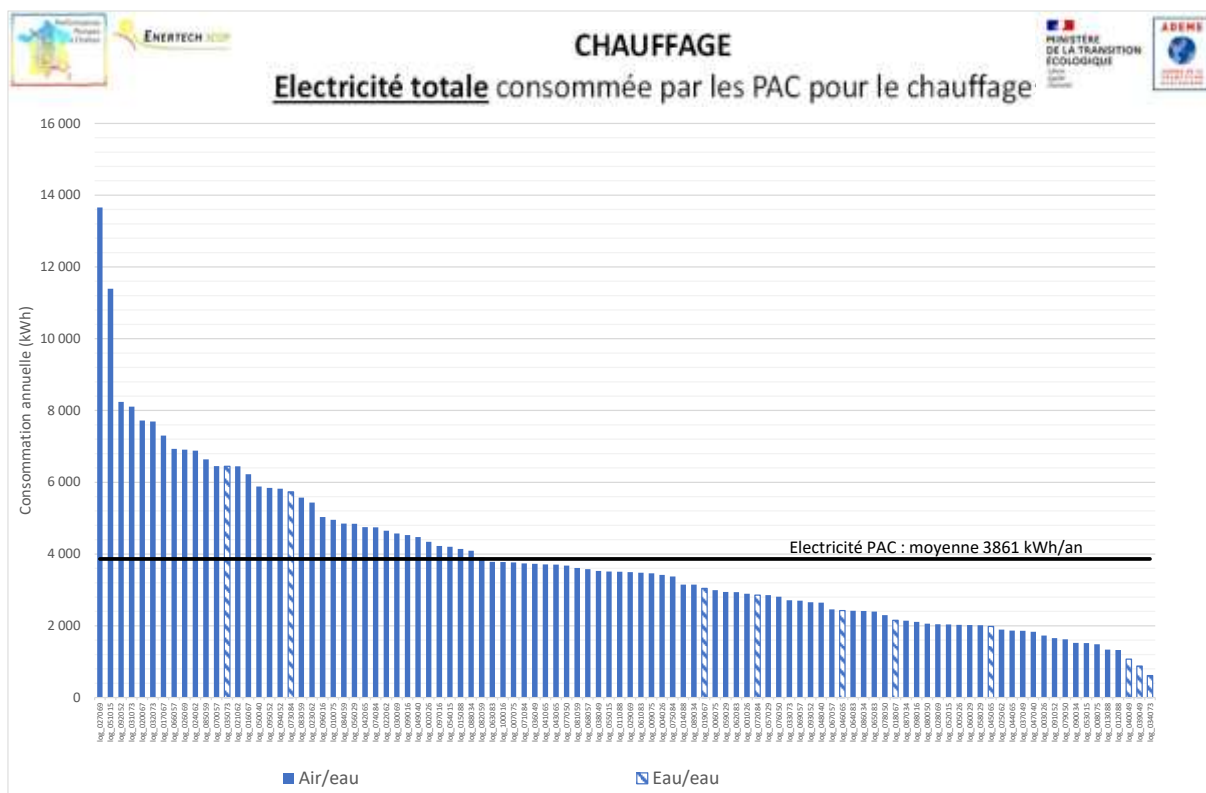


Figure 130 : Electricité totale consommée par les PAC pour le chauffage

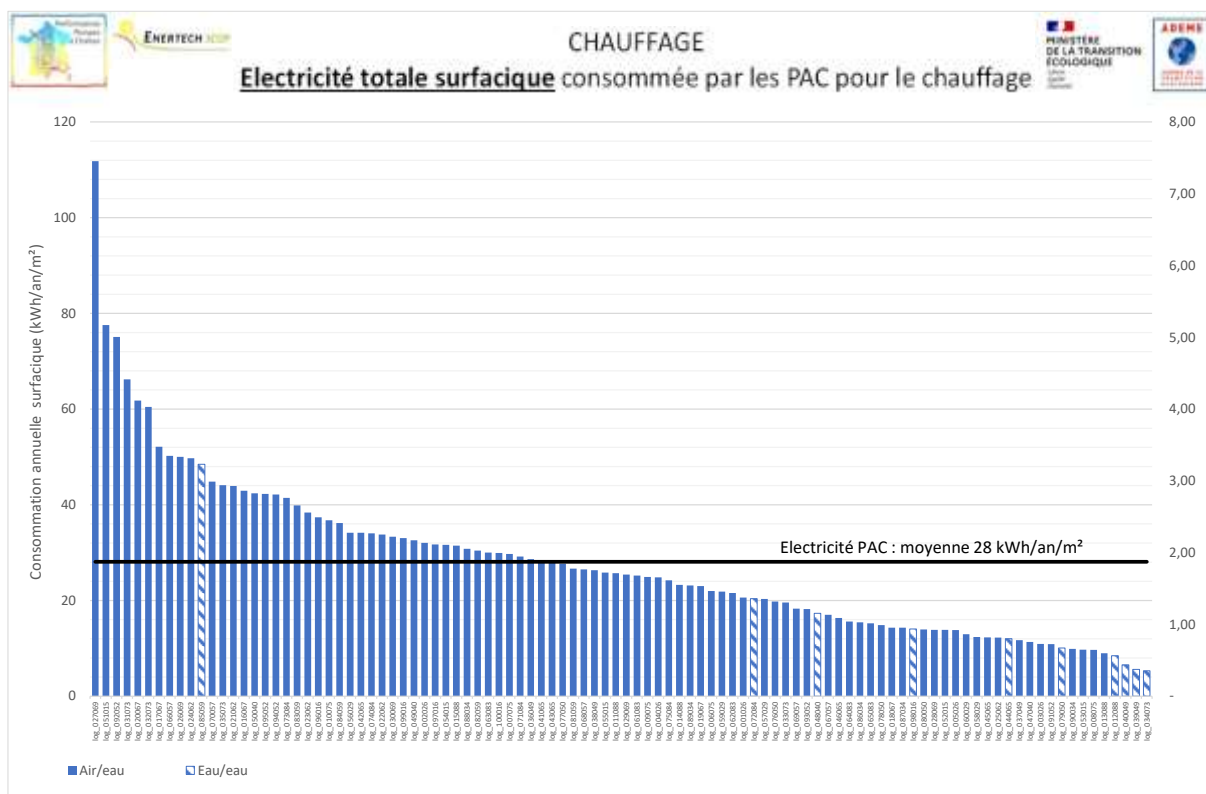


Figure 131 : Electricité totale surfacique consommée par les PAC pour le chauffage

2.2.3.2. Thermosensibilité des consommations électriques et des COP

La Figure 132 présente la thermosensibilité des consommations électriques des PAC pour le chauffage et montre, sans surprise, que cette consommation présente une sensibilité à la température extérieure très nette et régulière jusqu'à la température de -4°C . En outre, **aucune cassure de pente n'est visible sur un éventuel effet des résistances électriques d'appoint aux températures froides** : les PAC continuent de fonctionner en mode thermodynamique.

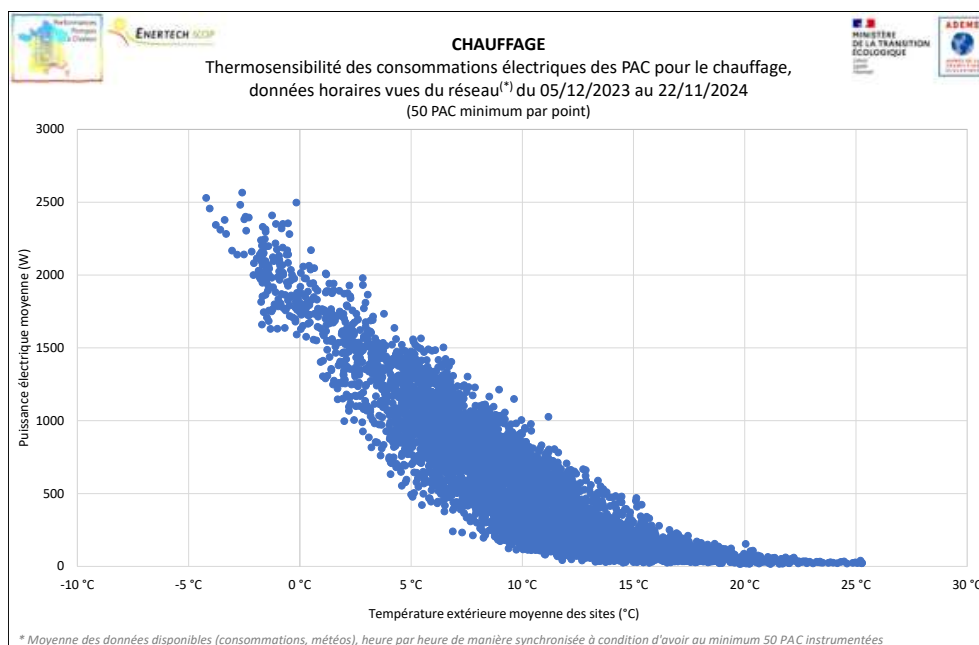
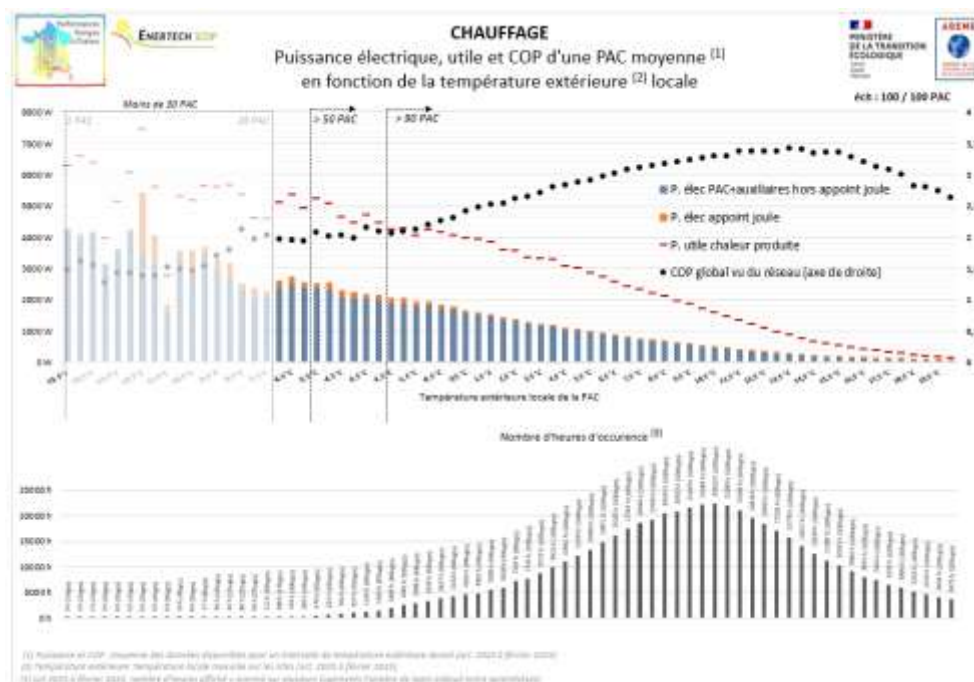


Figure 132 : Thermosensibilité des consommations électriques des PAC pour le chauffage

La Figure 133 précise la thermosensibilité de la puissance électrique utile et du COP chauffage. Nous observons que la production de chaleur suit une tendance lorsque les températures diminuent, avec une pente moins prononcée expliquée par l'affaiblissement du COP de 3 à 2. Ces données montrent que sur notre échantillon, **une PAC moyenne, à -5°C , consomme 2500 W d'électricité (dont 8% d'appoint joule), pour 5000 W de chaleur produite, soit un COP de 2.**

Pour mieux lire ce graphique : La vague de froid du 20 janvier 2024 - qui fait l'objet d'une analyse dédiée au paragraphe qui suit - correspond à une température moyenne de -4°C à l'échelle du territoire et crée localement des valeurs de -10°C à -12°C sur certaines stations de l'échantillon.

Le COP global culmine à 3,3 aux alentours de $13-14^{\circ}\text{C}$ de température extérieure moyenne. Le COP moyen de 2 serait toujours d'actualité selon nos données jusqu'à $-8,5^{\circ}\text{C}$ de température extérieure (où l'échantillon est de 22 logements). Ce COP chuterait ensuite à 1,5 pour -15°C de température extérieure (cette conclusion étant fragile car il n'y a qu'un seul logement dans l'échantillon qui a subi cette température).



La part relative de la consommation d'appoint joule d'une PAC moyenne en fonction de la température extérieure est présentée sur la Figure 134 et montre **des fonctionnements d'appoints anormaux** (notamment pour des températures extérieures clémentes).

2.2.3.3. Vague de froid du 20 janvier 2024 vue du réseau

La performance des PAC lors des pics de froid peut être analysée vue du réseau plus en détail à partir des mesures effectuées le 20 janvier 2024. La température extérieure moyenne tirée des stations de l'échantillon est présentée en Figure 135, sur l'ensemble de la campagne.

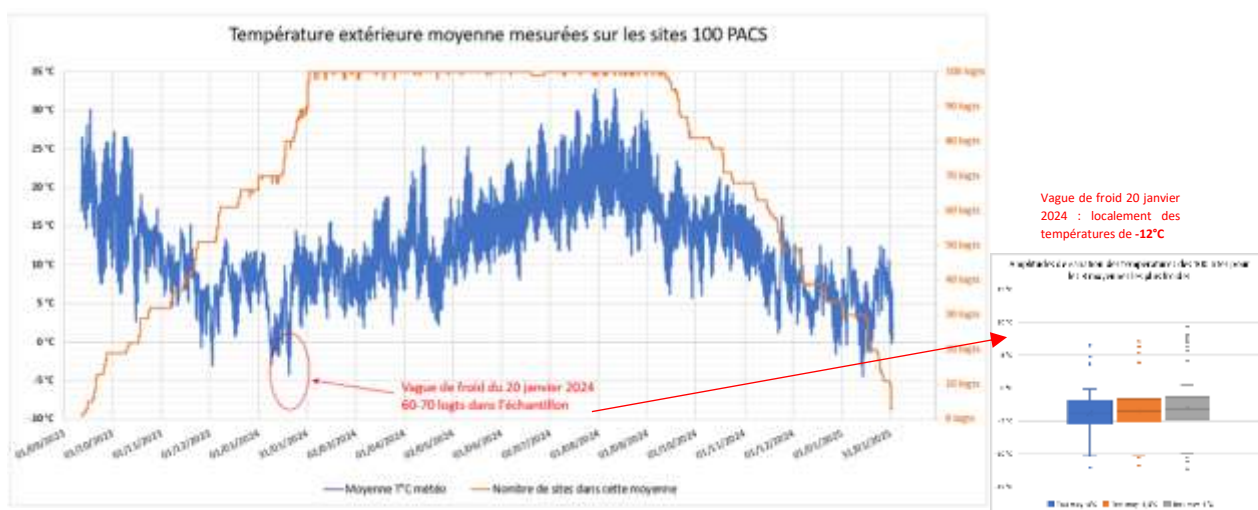


Figure 135 : Température extérieure moyenne mesurée sur les PAC de l'échantillon et nombre de sites instrumentés à date

La vague de froid du 20 janvier 2024 est celle qui comporte le plus de sites instrumentés à l'échelle du projet. Les données de consommation et de COP mesurées lors de la vague de froid du 20 janvier 2024 sont présentées sur la Figure 136.

Soixante-dix logements composaient notre échantillon ce jour-là. La température extérieure moyenne a atteint -4,2°C à 8h00 le matin. La puissance électrique totale d'une PAC moyenne vaut à cet instant 2934 W_{él}, dont 404 W_{él} (14%) liés à l'appoint. La chaleur produite (après déduction de 155 W_{ut} de chaleur pour le dégivrage) est de 5748 W_{ut}. **Par comparaison à du chauffage à effet joule pur, la puissance appelée sur le réseau électrique est donc réduite de 49%, avec un COP moyen mesuré proche de 2, lors de cette vague de froid.**

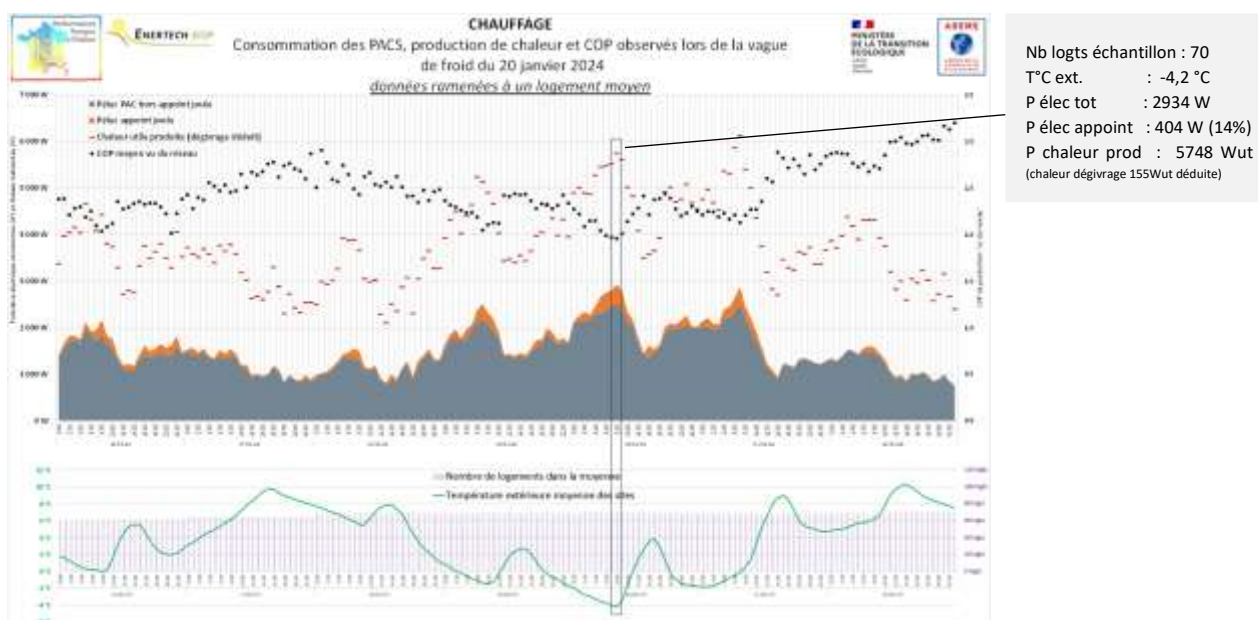


Figure 136 : Consommation des PACS, production de chaleur et COP mesurés lors de la vague de froid du 20 janvier 2024

2.2.3.4. Courbe de charge électrique vue du réseau sur l'hiver

La Figure 137 présente la courbe de charge horaire d'appel de puissance électrique de la PAC d'un logement moyen du 1^{er} décembre 2023 au 29 février 2024. Nous observons une tendance à l'augmentation de la puissance électrique appelée avec l'abaissement de la température extérieure. Nous observons 30% de consommation en plus la nuit (22h-10h) que le jour (10h-22h). Le pic de consommation se produit à 7 heures du matin.

Afin d'optimiser le COP des PAC, il semble opportun de mieux gérer cette intermittence jour/nuit en concentrant les demandes de chauffage en journée pour bénéficier de températures extérieures plus clémentes, et donc d'un meilleur rendement. Les analyses montrent en effet qu'une proportion majoritaire de production en journée (10h-20h) permettrait de gagner environ 0,5 points de COP.

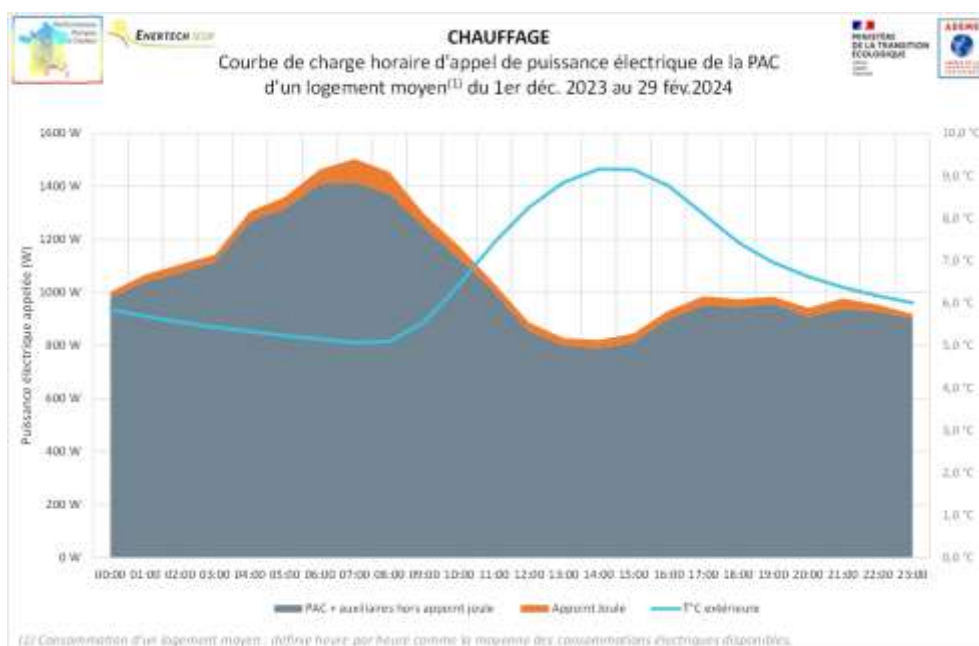


Figure 137 : Courbe de charge horaire d'appel de puissance électrique de la PAC d'un logement moyen du 1^{er} décembre 2023 au 29 février 2024

En moyenne hivernale, en comparant la courbe de charge des PAC aux données de Panel Elecdom (Figure 138) nous estimons qu'une PAC occasionne, dans un logement qui n'était pas pourvu de chauffage électrique, un déplacement de la puissance maximale atteinte en début de matinée (effet analogue au chauffage à effet joule), et que la puissance maximale de la courbe de charge augmente d'un facteur 3 à 3,5 (550W à 1750W).

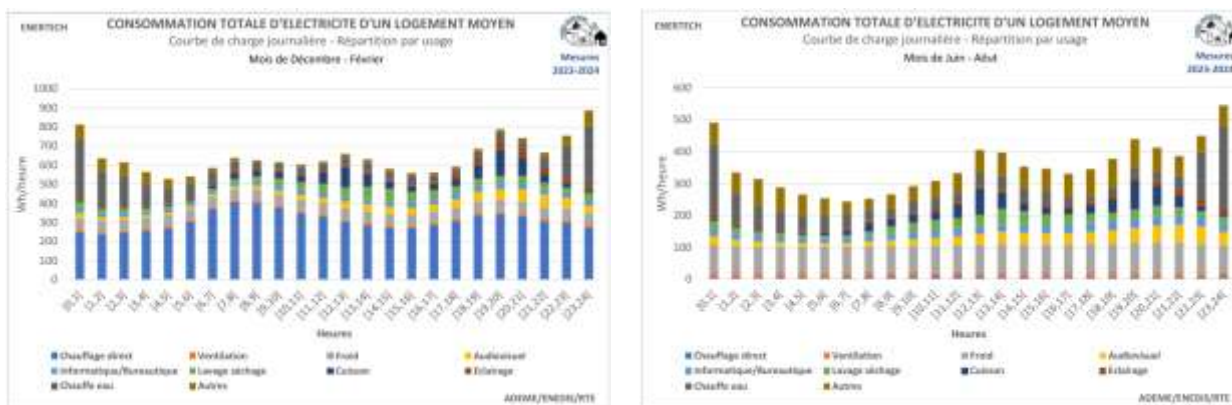


Figure 138 : Courbe de charge électrique d'un logement moyen français - Panel Elecdom année 5

3. Résultats sur l'eau chaude sanitaire

3.1. SCOP eau chaude sanitaire

3.1.1. Résultats généraux de la campagne de mesures

Le SCOP eau chaude sanitaire (ou SCOP ECS) est l'indicateur représentant l'efficacité de production annuelle des pompes à chaleur pour ce poste. Les COP saisonniers mesurés sur chaque installation sont présentés sur la Figure 139.

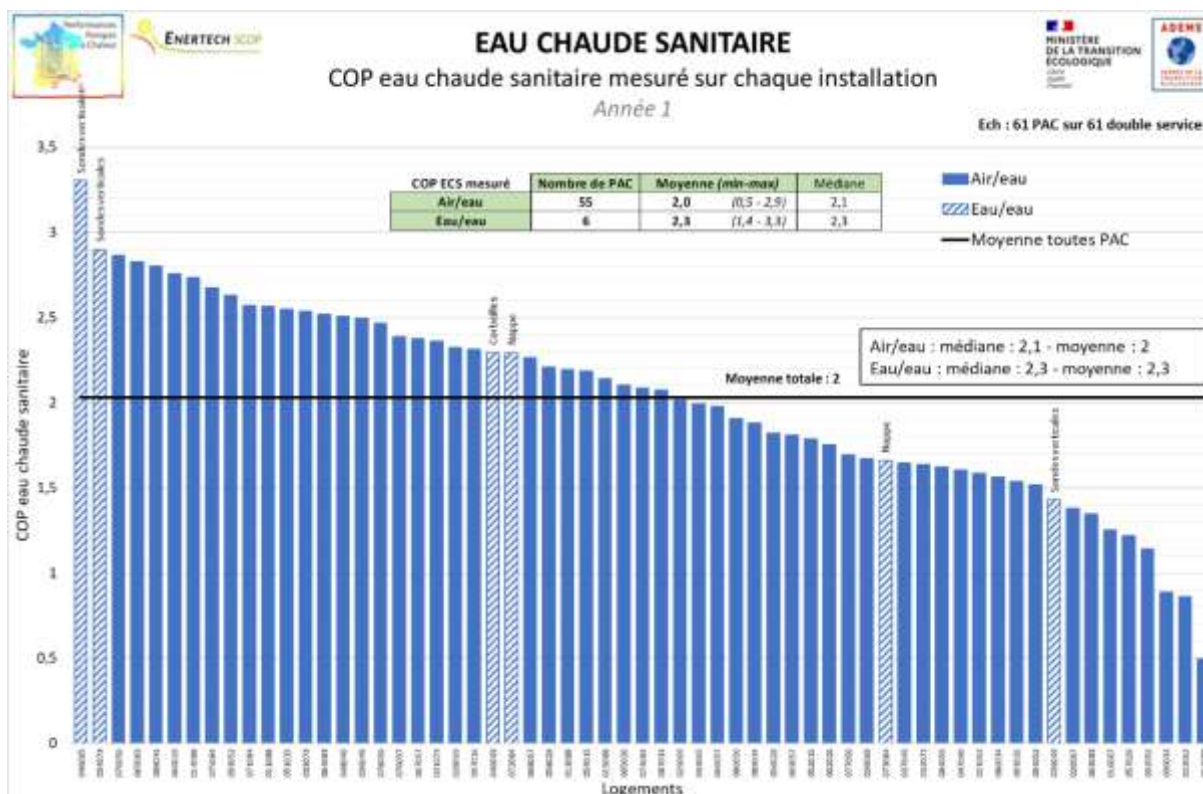


Figure 139 : SCOP ECS mesurés sur chaque installation

Le SCOP ECS mesuré moyen s'élève à 2,0 pour les PAC air/eau et à 2,3 pour les eau/eau. Ces résultats sont plutôt décevants : avec 46% de l'échantillon qui présente un COP inférieur à 2, la PAC air/eau est probablement légèrement moins performante que les chauffe-eaux thermodynamiques individuels (CETI)²³.

Par ailleurs, alors que certains dysfonctionnements engendrent des SCOP ECS inférieurs à 1 sur 3 logements²⁴, des SCOP entre 2,5 et 3 ont aussi été mesurés sur les installations les plus performantes.

Ces éléments n'entendent pas conclure qu'il faille privilégier les configurations « PAC simple service + CETI » au détriment des configurations « PAC double-service » (d'autant plus que ces dernières présentent de meilleurs SCOP de chauffage), mais plutôt que **des marges d'améliorations significatives existent sur ce poste**.

La Figure 140 présente les SCOP ECS mesurés pour les PAC air/eau.

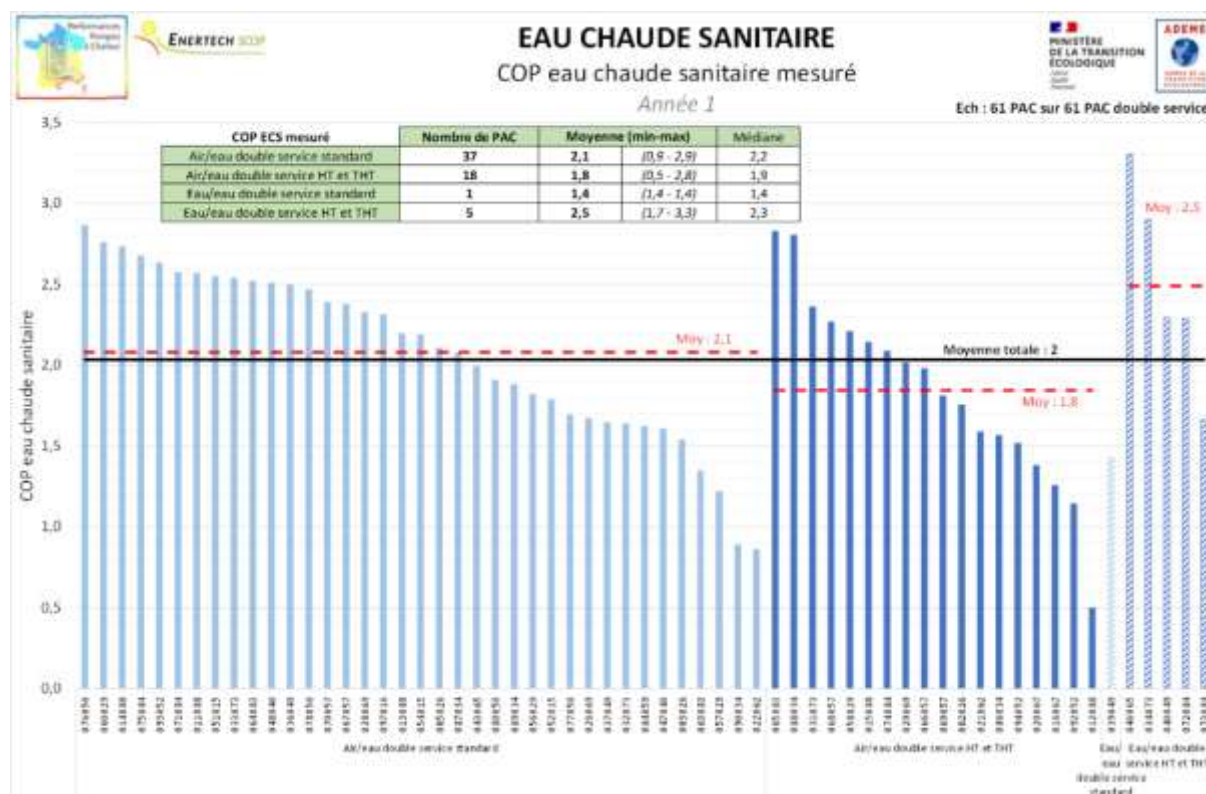


Figure 140 : COP saisonnier (SCOP) ECS mesuré sur les PAC air/eau

La Figure 140 indique un SCOP ECS dégradé d'environ 15% sur les PAC haute température par rapport aux standards. Nous verrons avec l'analyse à travers le COP Carnot et l'efficacité par rapport à Carnot f que **cette dégradation s'explique par les conditions de fonctionnement des machines** (eau plus chaude, région plus froide, etc.).

La Figure 141 présente les SCOP ECS mesurés pour les PAC eau/eau.

²³ Retours de campagnes de mesures d'Enertech sur une dizaine d'unités.

²⁴ Un SCOP inférieur à 1 est possible en cas de fonctionnement en effet joule pur avec l'ajout des consommations d'auxiliaires.

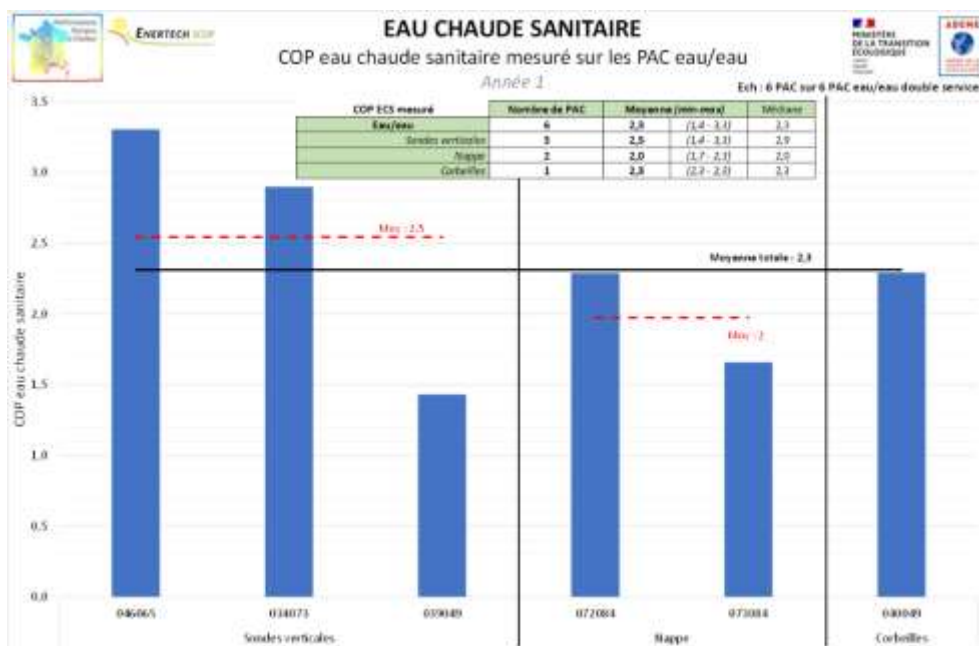


Figure 141 : COP saisonnier (SCOP) ECS mesuré sur les PAC eau/eau

Les SCOP ECS des PAC eau/eau ne dépassent 3 que dans 1 cas sur 6, ce qui constitue un résultat plutôt décevant pour cette technologie.

3.1.2. Paramètres explicatifs des SCOP ECS mesurés

3.1.2.1. Le SCOP de Carnot et l'efficacité par rapport à Carnot

Le graphique de la Figure 142 met en regard le facteur d'efficacité par rapport à Carnot²⁵ aux SCOP ECS mesurés.

²⁵ Calculé uniquement sur les plages horaires de production ECS, cf.§1.3.3

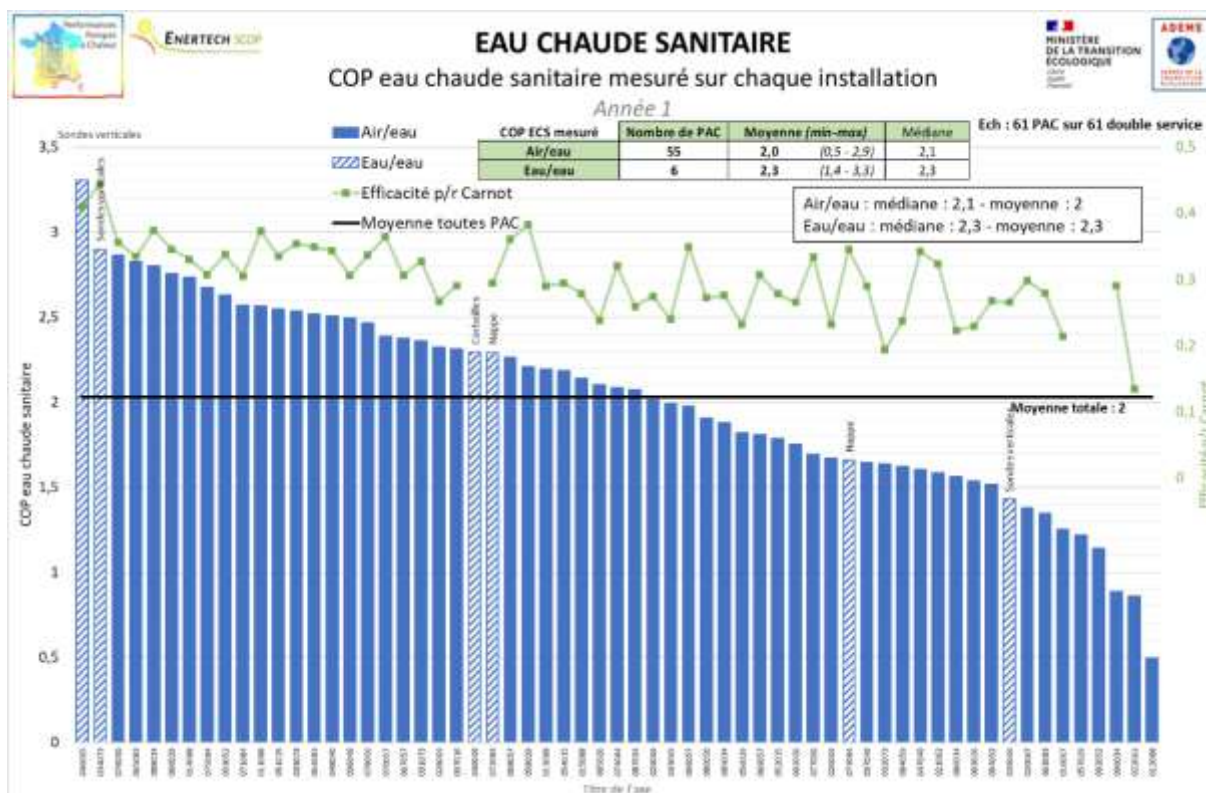


Figure 142 : COP saisonnier de l'ECS sur chaque installation et facteur d'efficacité par rapport à Carnot

Comme pour le chauffage, le facteur d'efficacité par rapport à Carnot f se situe entre 0,2 et 0,4 dans la grande majorité des cas.

La Figure 143 présente les SCOP Carnot mesurés pour l'ECS pour les PAC air/eau et eau/eau. Le graphique met en évidence que le SCOP ECS moins performant observé pour les PAC haute température s'explique principalement par un COP Carnot inférieur, et donc des conditions aux bornes qui leur sont moins favorables (eau plus chaude ou région plus froide, etc.).

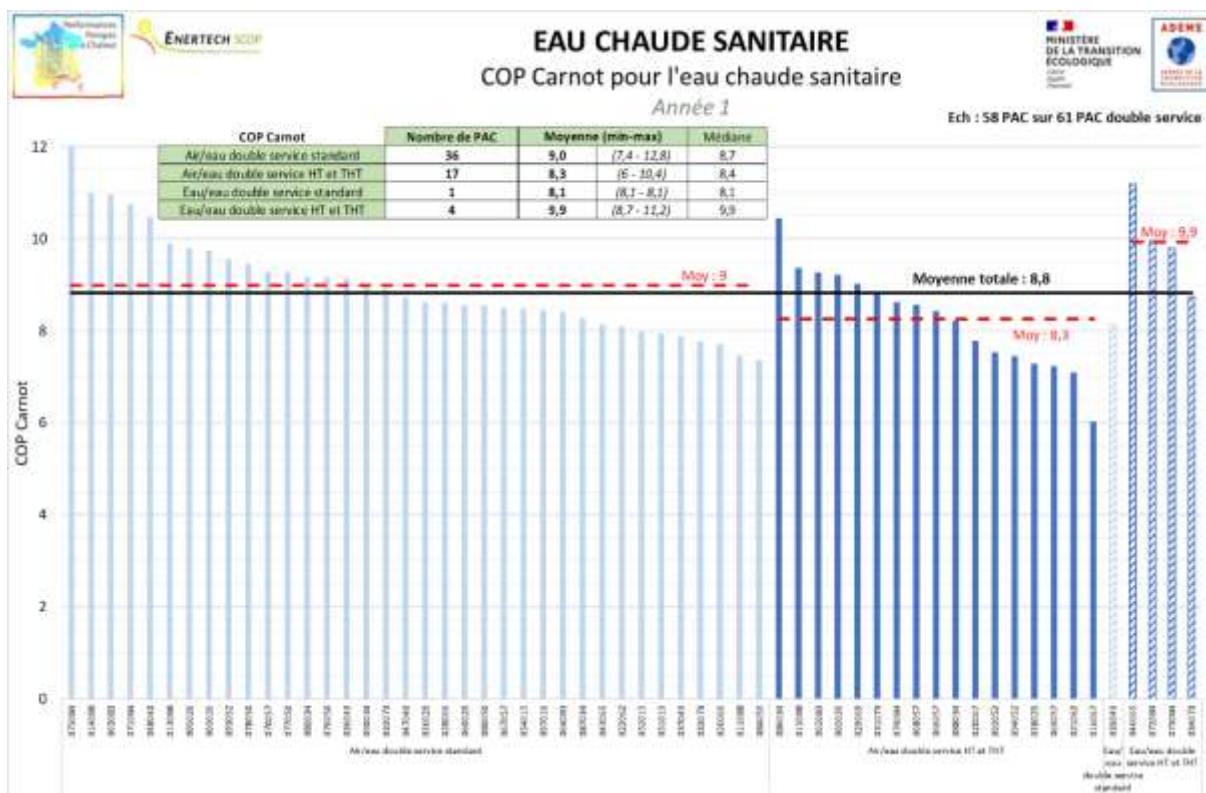


Figure 143 : COP saisonnier de Carnot (SCOP Carnot) ECS mesuré sur les PAC air/eau et eau/eau

La Figure 144 présente l'efficacité par rapport à Carnot f des PAC air/eau et eau/eau. Sur ce graphique, nous observons bien une **efficacité f similaire entre les PAC standards et les hautes températures**, la différence entre ces types de PAC n'est pas pas liée à la performance intrinsèque des machines, mais plutôt aux conditions à leurs bornes.

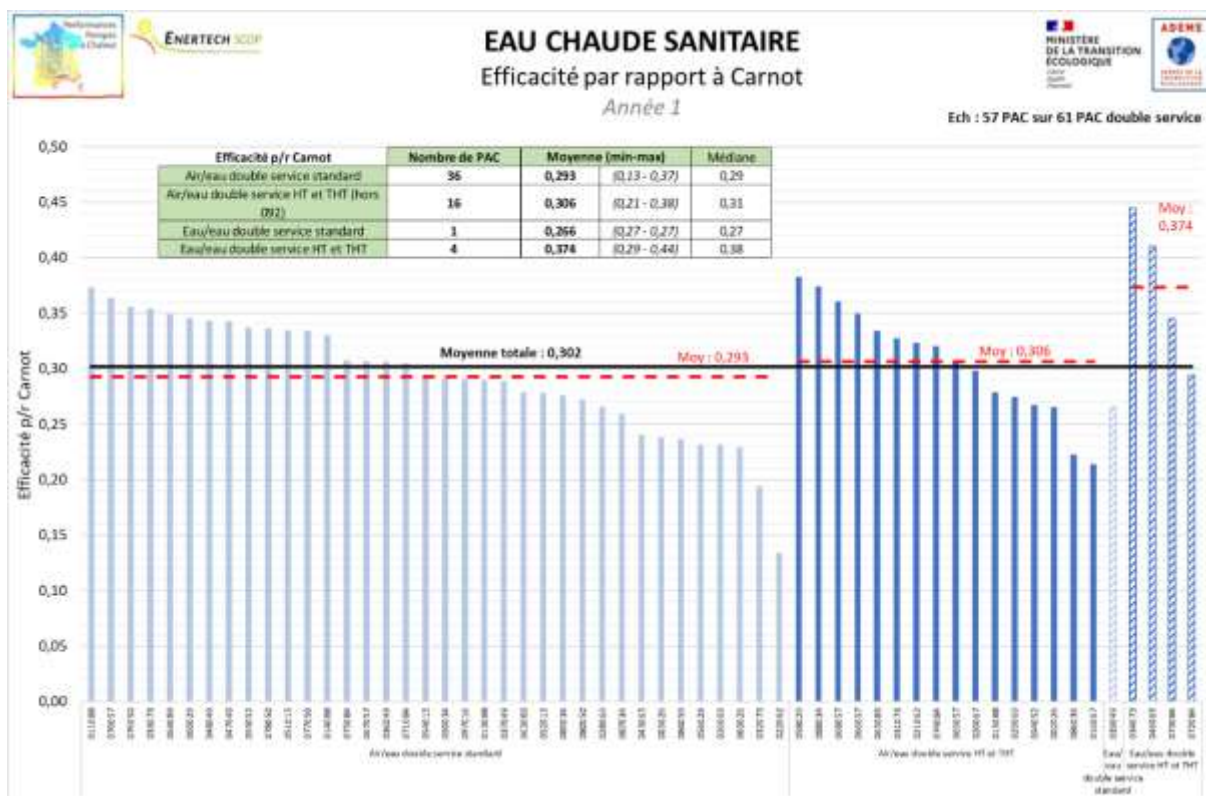


Figure 144 : Efficacité par rapport à Carnot des PAC air/eau et eau/eau

La Figure 145 présente les SCOP Carnot mesurés pour l'ECS pour les PAC eau/eau.

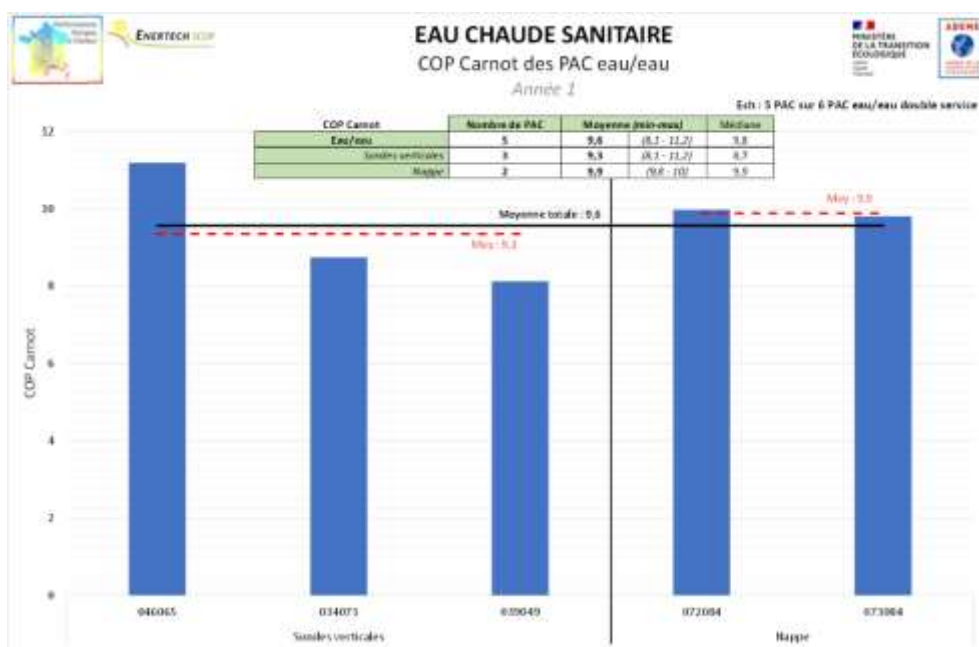


Figure 145 : COP saisonnier de Carnot (SCOP Carnot) ECS mesuré sur les PAC eau/eau

Les SCOP Carnot des PAC eau/eau sont **assez proches de ceux des air/eau** du fait notamment des mêmes températures de production, contrairement au chauffage où les eau/eau travaillent plus souvent sur des planchers.

La Figure 146 présente l'efficacité par rapport à Carnot f des PAC eau/eau. Des efficacités significativement plus élevées ont été mesurées sur les sondes verticales avec, comme pour le chauffage, le sujet de l'impact des pompes de nappe et l'influence de la source froide sur l'efficacité.

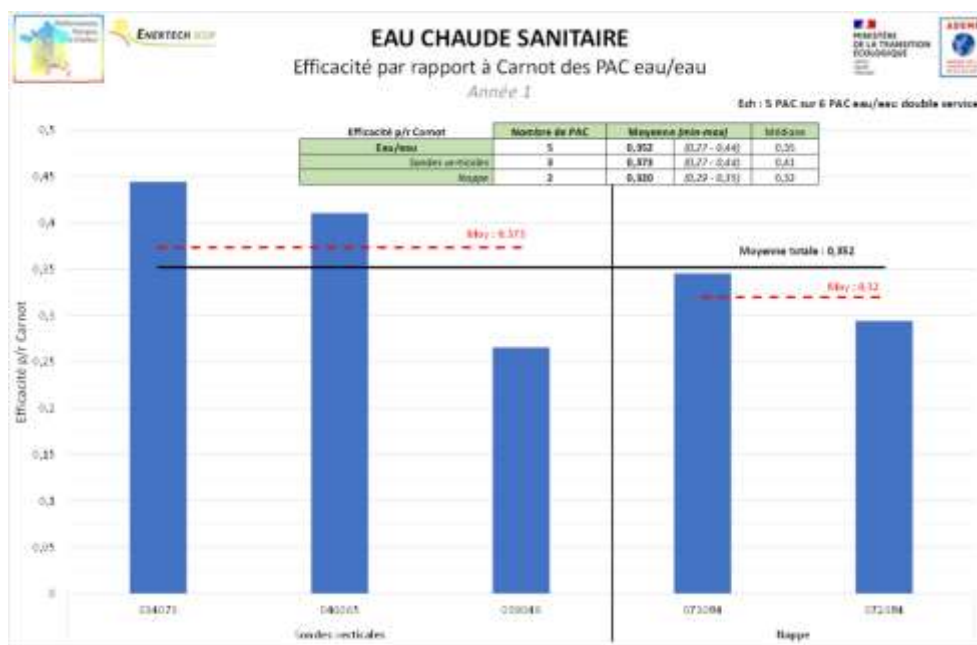


Figure 146 : Efficacité par rapport à Carnot des PAC eau/eau

3.1.2.2. Température de production de l'ECS

La Figure 147 présente la température de production de l'ECS (température de charge du ballon) des logements de notre échantillon.

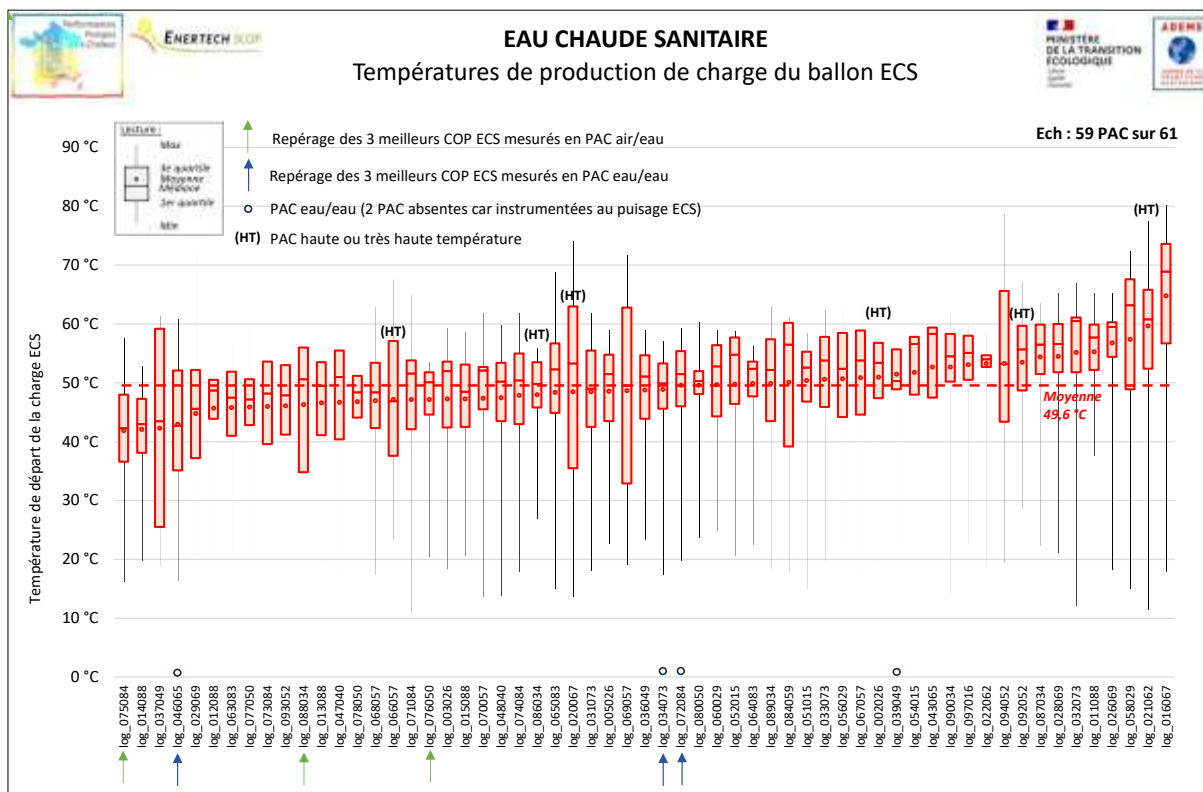


Figure 147 : Températures de production de charge du ballon ECS de chaque logement, triées par moyenne croissante

En moyenne, les PAC de l'échantillon produisent la chaleur chargeant le ballon ECS à 49,6°C. Si l'on considère les **maximums**, censés refléter les conditions de fin de charge des ballons, leur moyenne culmine à 62,3°C sur les températures de départ (avec un maximum à 80,2°C) et à 58°C pour les retours (maximum de 78,4°C).

Les **corrélations** entre les températures de production et les 3 meilleurs COP en air/eau et eau/eau sont **présentes** mais moins franches que pour le chauffage, du fait de l'impact des veilles et du fonctionnement des résistances d'appoint sur le résultat.

Les volumes de stockage des ballons ECS des PAC valant 200L en général, **une marge probable de baisse de la consigne d'ECS est identifiée dans au moins un bon quart des logements**. Le travail du compresseur pour le simple maintien en chauffe d'un ballon peu sollicité (très probable lorsqu'il fait 200L) se fait à très mauvais COP. Ainsi, **il nous semble souhaitable que les fabricants proposent une gamme plus large de volumes de stockage d'ECS, avec par exemple des ballons de 100L ou de 150L, qui sont largement suffisants à 52°C pour deux personnes**. Une **marge sur la température de charge** est identifiée dans certains cas : cette température est parfois très élevée pour une consigne donnée, comme le témoigne les **maximums** qui **excèdent les 75°C dans certains logements**.

Notons enfin que les PAC haute température ne se retrouvent pas nécessairement sur les températures de production ECS les plus chaudes. **Cette tendance, similaire à celle observée sur le chauffage (cf. §2.1.3.2), remet en cause l'intérêt de l'option haute température** qui occasionne en général un surcoût matériel.

3.1.2.3. Part des résistances d'appoint et des consommations hors production

La Figure 148 présente la répartition par usage de l'électricité consommée pour l'eau chaude sanitaire sur l'ensemble des logements de l'échantillon. **La part des résistances d'appoint est plus importante que pour le chauffage et représente 17% de l'électricité consommée pour l'ECS**. La consommation électrique hors production de chaleur (veilles, circulateurs hors production, etc.) est, elle aussi,

significative et vaut 15,3% du total. Sur ce graphique, le **dégivrage** reste **anecdotique** puisqu'il représente moins de 0,5% de la consommation du poste ECS. La répartition montre qu'au total, environ un tiers de la consommation électrique du poste ECS est attribuable aux résistances d'appoint et aux consommations hors production.

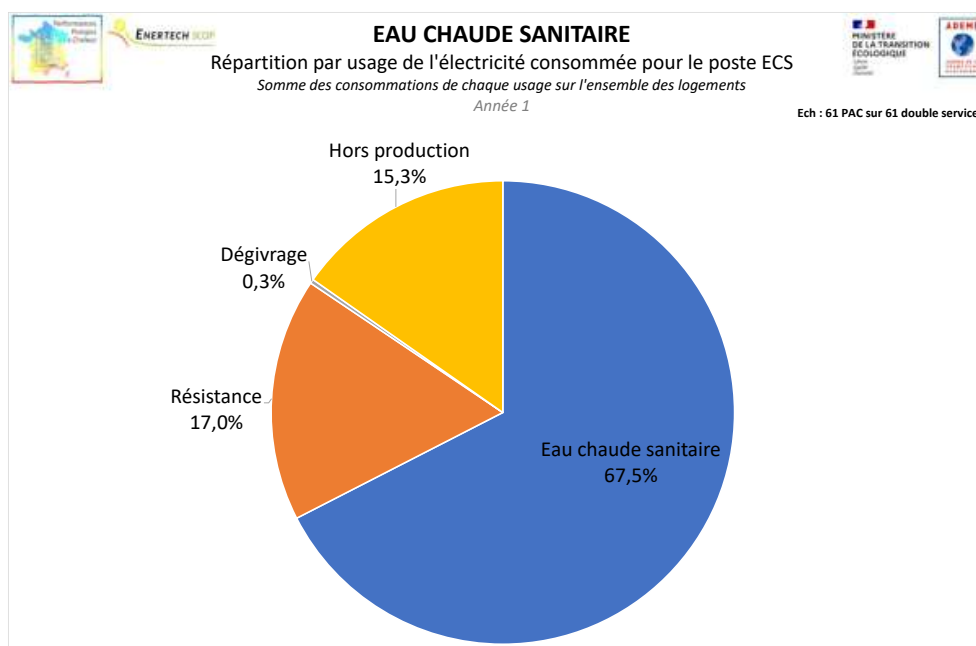


Figure 148 : Répartition par usage de l'électricité consommée pour le poste eau chaude sanitaire sur l'ensemble des logements

La Figure 149 montre que la **part de la résistance et de la « veille »** est très hétérogène entre les **logements**. L'appoint joule représente de 0 à 100% de la consommation d'électricité pour l'ECS, montrant à la fois des installations où son utilisation est maîtrisée et d'autres relevant de **lourds dysfonctionnements**. Dans les cas où le déclenchement de la résistance électrique se fait de façon intempestive, il est à se demander s'il n'est pas préférable de la désactiver en base.

La part de la veille, très variable elle aussi, peut être expliquée par la durée des périodes de production d'ECS qui sont plus brèves que les temps de fonctionnement du chauffage.

De nombreux logements n'ont **pas de programme horaire sur la production d'ECS**, alors que les **volumes de stockage associés à des consignes raisonnables** (variables selon la typologie des logements) permettraient de concentrer la recharge des ballons en début d'après-midi, où la température extérieure est plus clémente, où l'efficacité de production est meilleure et le recours à la **résistance d'appoint** moins « nécessaire ». Cette meilleure performance n'est pas toujours cohérente avec l'abonnement des logements, qui est parfois en heures pleines/heures creuses avec des tarifs d'achat plus intéressants la nuit. La mise en œuvre prochaine des heures creuses de jour permettra de concilier le tarif d'achat de l'électricité et la meilleure performance des PAC lorsque la production de chaleur est en journée.

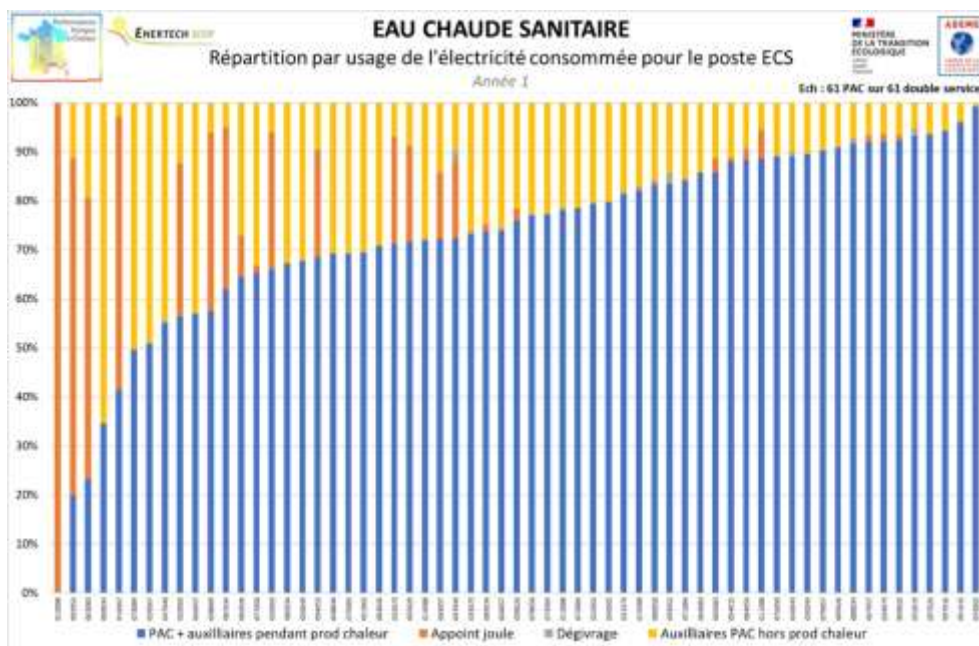


Figure 149 : Répartition par usage de l'électricité consommée pour le poste eau chaude sanitaire dans chacun des logements

3.1.3. Recherche de corrélation du SCOP ECS mesuré

Vu l'importance dans le bilan global de leurs consommations, il est naturel de tenter de corréler le SCOP ECS mesuré à la part non thermodynamique des consommations, à savoir celle de l'appoint joule, de la consommation hors production de chaleur et, dans une moindre mesure, du dégivrage (Figure 150). La corrélation est assez bonne, asseyant le constat que la limitation du fonctionnement de l'appoint joule, des circulateurs hors production et des veilles, est un facteur de performance de production d'ECS.

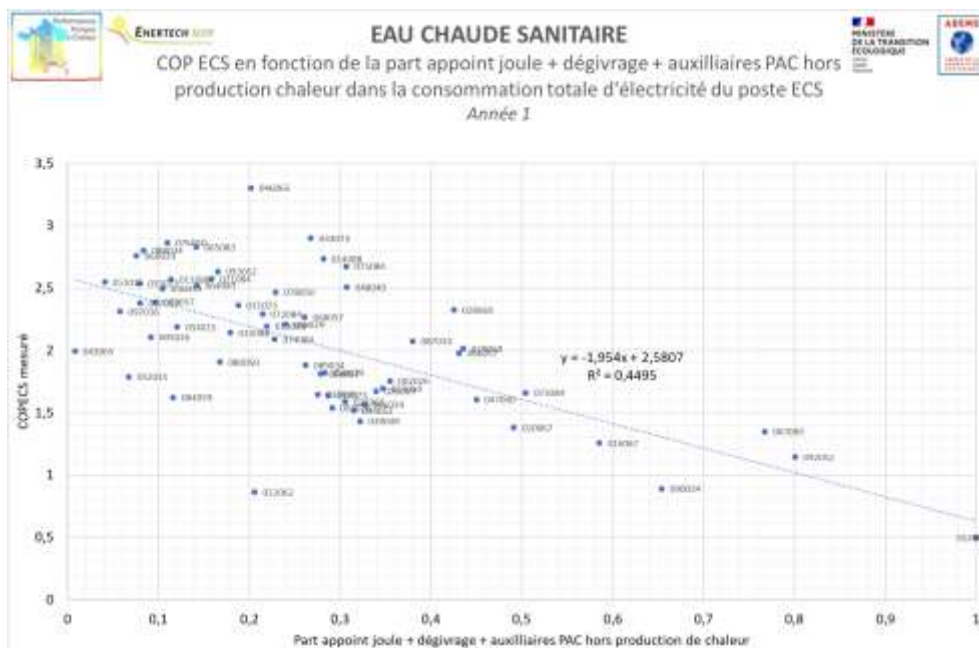


Figure 150 : Corrélation entre le SCOP ECS mesuré et la part non thermodynamique des consommations (appoints électriques, consommation hors production)

Le deuxième facteur venant à l'esprit est la température de production d'ECS moyenne, celle-ci reflétant le réglage de la consigne mais aussi la quantité d'ECS puisée : pour une même consigne, la température de production sera plus importante si le ballon a connu peu de puisages que s'il est plus froid.

La Figure 151 présente la corrélation entre l'erreur du modèle précédent (Figure 150) et la température de production d'ECS moyenne. Une légère corrélation apparaît, ce qui fait de la température de production un facteur explicatif bien que d'autres rentrent manifestement en jeu, comme par exemple la température de la source froide lors de la production.

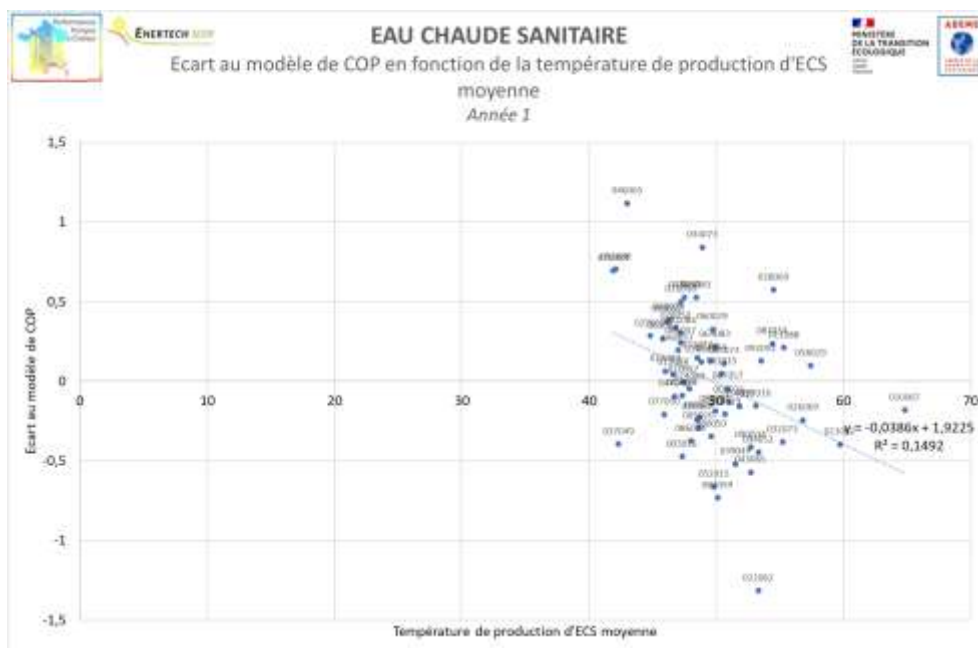


Figure 151 : Ecart au modèle de SCOP en fonction de la température de production d'ECS moyenne

3.2. Besoins de chaleur et consommations de l'eau chaude sanitaire

3.2.1. Besoins de chaleur pour l'eau chaude sanitaire

La Figure 152 présente la chaleur utile totale du poste ECS pour chaque logement de l'échantillon (rappel : cette chaleur inclut les pertes du ballon de stockage, cf. Partie 1 §2.3.3). Le logement 016067 écrase complètement l'échelle par rapport aux autres logements car il a connu des fuites sur le réseau d'eau chaude sanitaire. Ainsi, nous préférons écarter ce logement des moyennes et réajuster le graphique pour apprécier des valeurs plus ordinaires.

Le besoin de chaleur des logements de l'échantillon (hors logement 016067) pour l'ECS s'élève à 1 614 kWh_{ut}/an en moyenne (médiane à 1 411 kWh_{ut}/an). Cette valeur est en cohérence avec ce qui est mesuré sur les cumulus électriques dans le cadre d'autres campagnes. **La dispersion des besoins est spectaculaire, d'un rapport de 1 à 8, ce qui lui confère une importance de premier ordre dans l'explication de la consommation d'électricité des PAC pour l'ECS.**

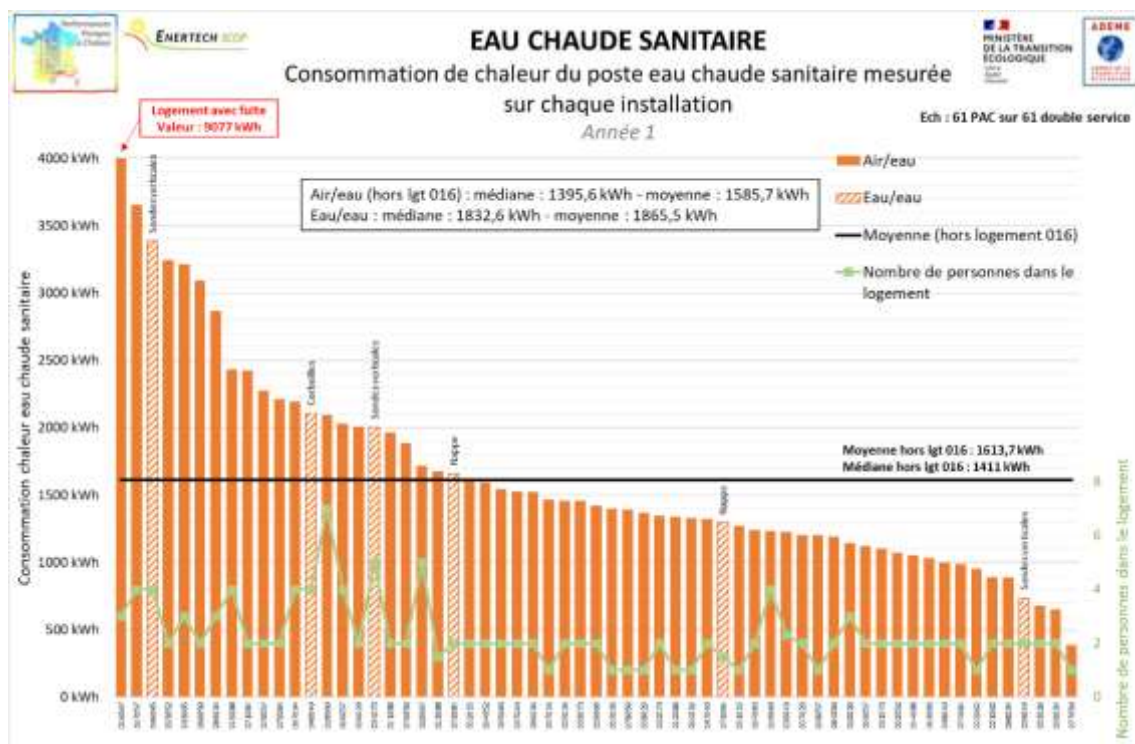


Figure 152 : Chaleur utile totale du poste ECS pour chaque logement

La chaleur utile surfacique totale du poste ECS de chaque installation est présentée sur la Figure 153. Ce **besoin de chaleur surfacique s'élève à 11 kWh_{ut}/m².an en moyenne**, ce qui est 7 fois inférieur au besoin de chaleur moyen pour le chauffage. Sur ce graphique, la corrélation semble assez bruitée avec le nombre de personnes du foyer pondéré par leur occupation (corrélation testée plus loin).

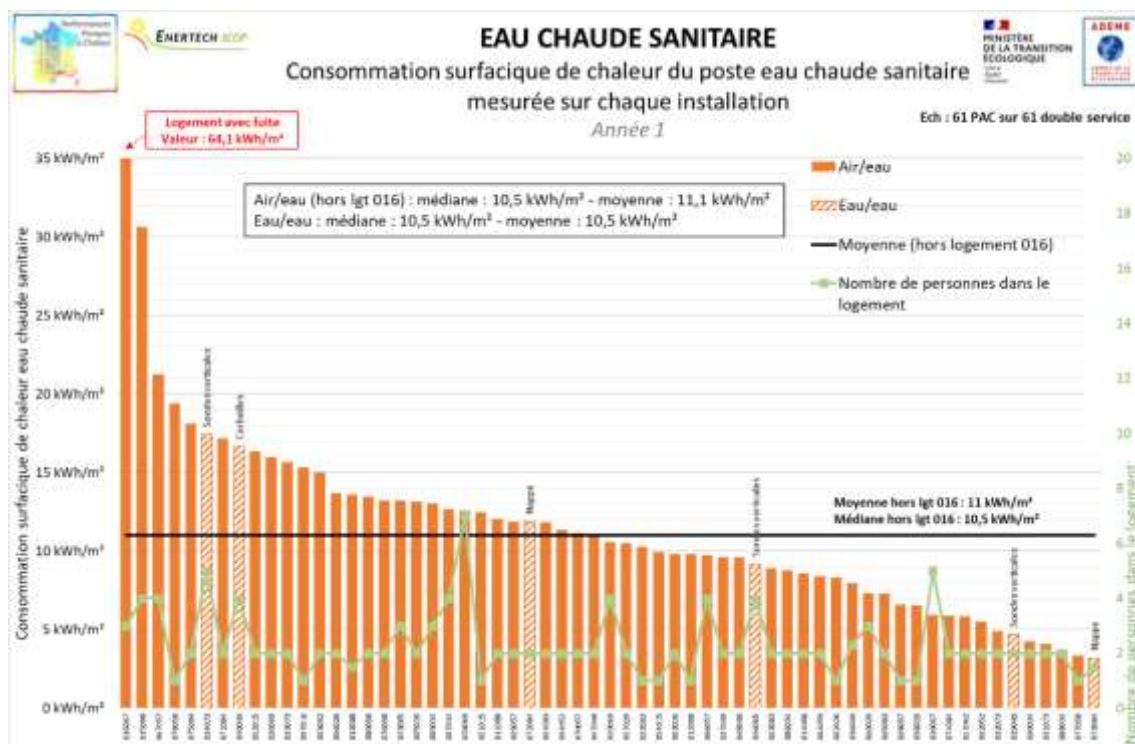


Figure 153 : Chaleur utile surfacique totale du poste eau chaude sanitaire de chaque logement

La Figure 154 présente la chaleur utile ramenée au nombre de personnes du foyer (pondérée par leur occupation) pour chaque installation. Une tendance semble se dégager sur ce graphique : avec quelques exceptions, plus il y a de personnes dans le logement, moins la consommation de chaleur pour l'ECS ramenée au nombre de personnes est importante.

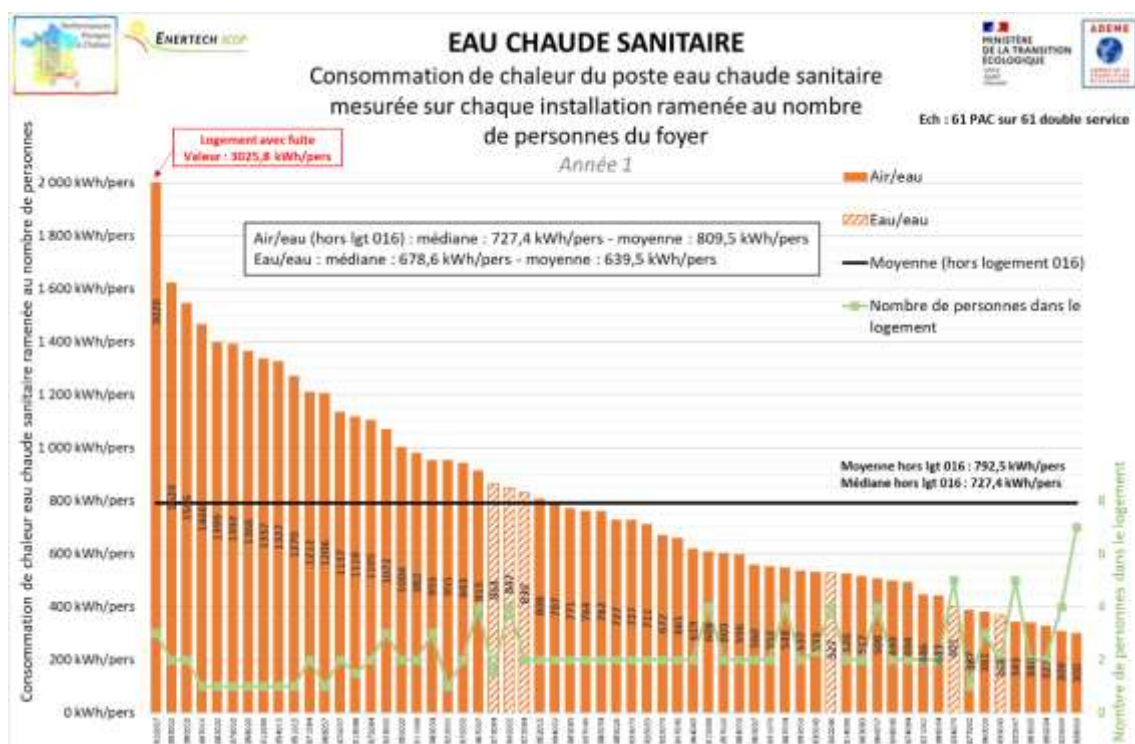


Figure 154 : Chaleur utile ramenée au nombre de personnes du foyer du poste eau chaude sanitaire

La Figure 155 présente la consommation de chaleur du poste ECS en fonction du nombre de personnes. La moyenne de la production de chaleur ECS est cohérente avec les données de Panel Elecdom (65 logements équipés de cumulus électriques) pour les logements de 1 et 2 personnes. Ces mesures montrent bien que **les consommations de chaleur moyennes pour l'ECS n'évoluent pas proportionnellement avec le nombre de personnes dans le foyer**.

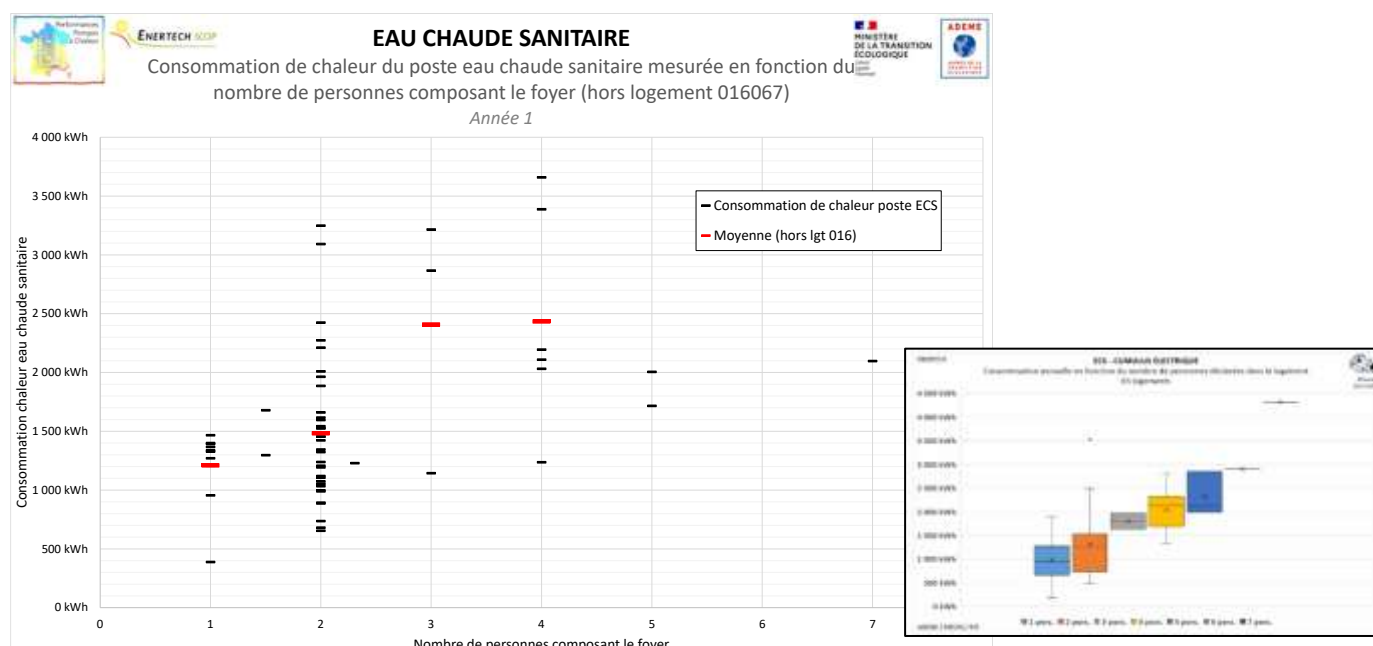


Figure 155 : Chaleur utile du poste eau chaude sanitaire en fonction du nombre de personnes composant le foyer

3.2.2. Comparaison des besoins de chaleur du chauffage et de l'eau chaude sanitaire

La répartition de la chaleur consommée entre l'eau chaude sanitaire et le chauffage est présentée sur la Figure 156. La chaleur produite pour le chauffage est en moyenne 7 fois supérieure à celle de l'eau chaude sanitaire, ce qui montre la prépondérance du sujet chauffage sur l'ECS.

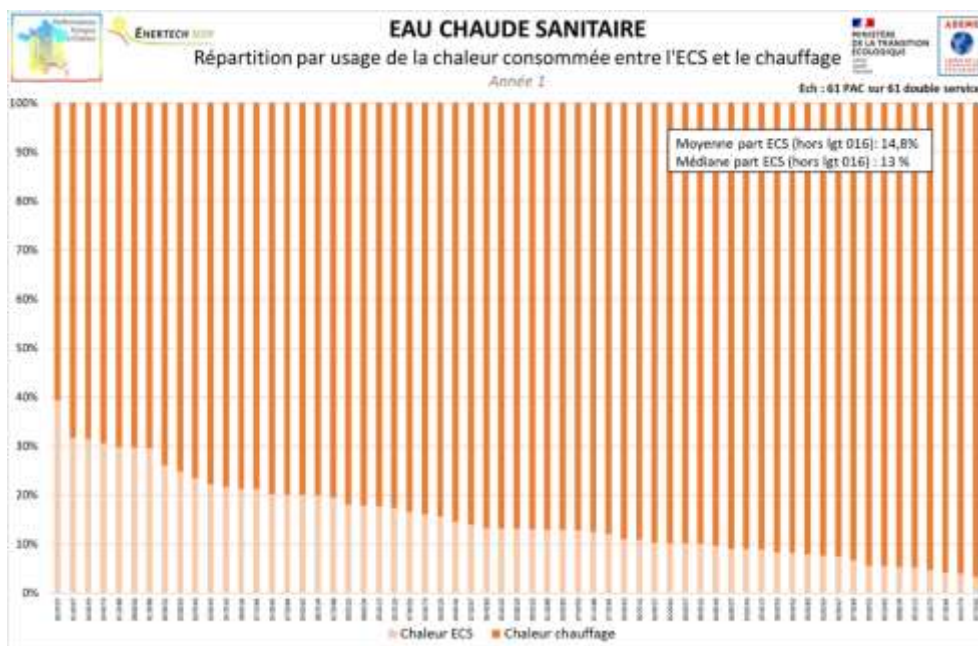


Figure 156 : Répartition de la chaleur consommée entre l'ECS et le chauffage

3.2.3. Consommations d'électricité pour l'eau chaude sanitaire

La consommation d'électricité consommée par les PAC double-service pour l'ECS est présentée sur la Figure 157. A la liste des logements au fonctionnement atypique, composée du logement 016067 qui a connu des fuites, s'ajoute le logement 012088 dont le mauvais montage hydraulique engendre la production d'une partie du chauffage par la résistance électrique du ballon ECS. Sa consommation électrique est donc anormalement élevée par rapport à sa production de chaleur pour l'ECS, il est donc écarté des moyennes.

La consommation moyenne d'électricité des PAC pour l'ECS s'élève à $800 \text{ kWh}_{el}/\text{an}$, avec une dispersion importante, de 1 à 10, entre le minimum et le maximum (hors logements 016 et 012). Avec les logements anormaux, cette consommation monte à $936 \text{ kWh}_{el}/\text{an}$. Cette dispersion semble, à première vue, peu liée au SCOP de production d'ECS (en vert sur le graphique).

La consommation surfacique d'électricité consommée par les PAC pour l'ECS s'élève à $5,5 \text{ kWh}_{el}/\text{m}^2.\text{an}$ en moyenne. Avec les logements 016 et 012, cette consommation monte à $5,7 \text{ kWh}_{el}/\text{m}^2.\text{an}$. Une grande disparité est encore une fois observée avec un rapport 10 entre le minimum et le maximum, peu liée au SCOP en première observation.

Les explications de ces consommations sont directement liées à celles exprimées sur le besoin de chaleur pour l'eau chaude sanitaire (§3.2.1) et sur le SCOP de production (§3.1).

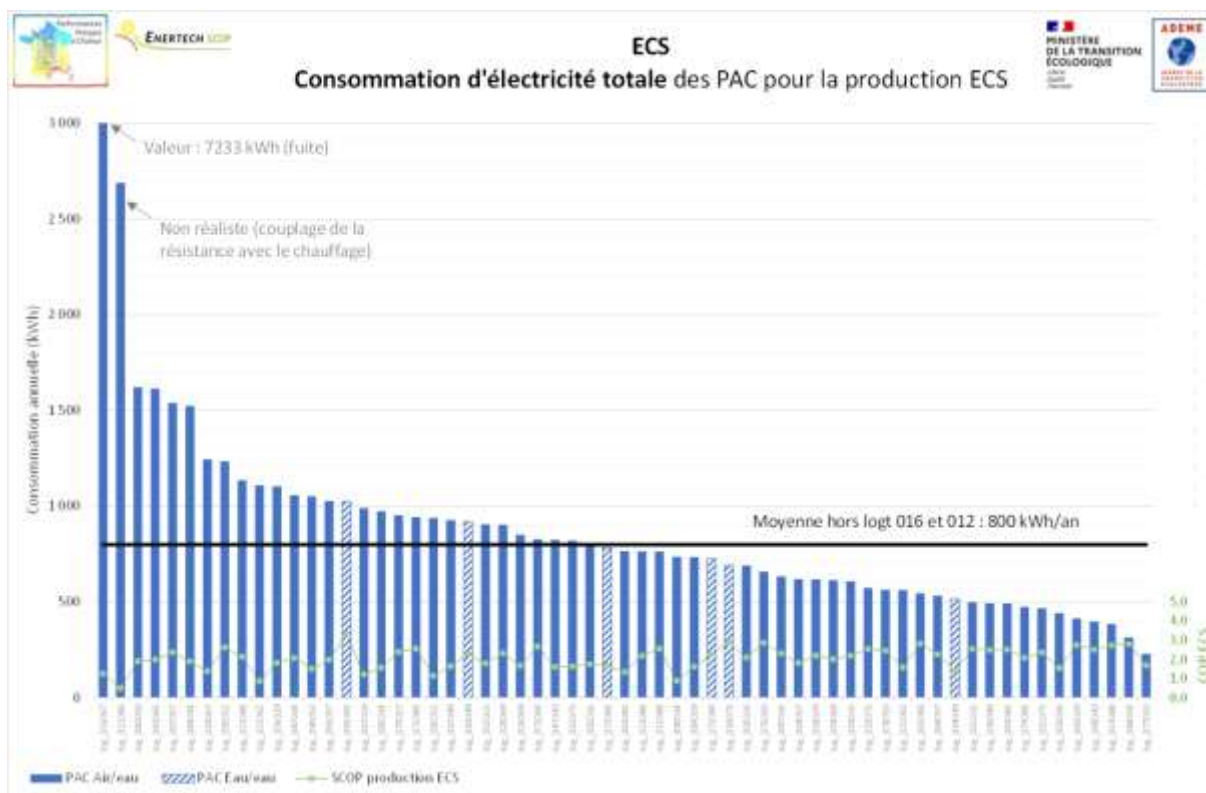


Figure 157 : Electricité totale consommée par les PAC pour l'ECS

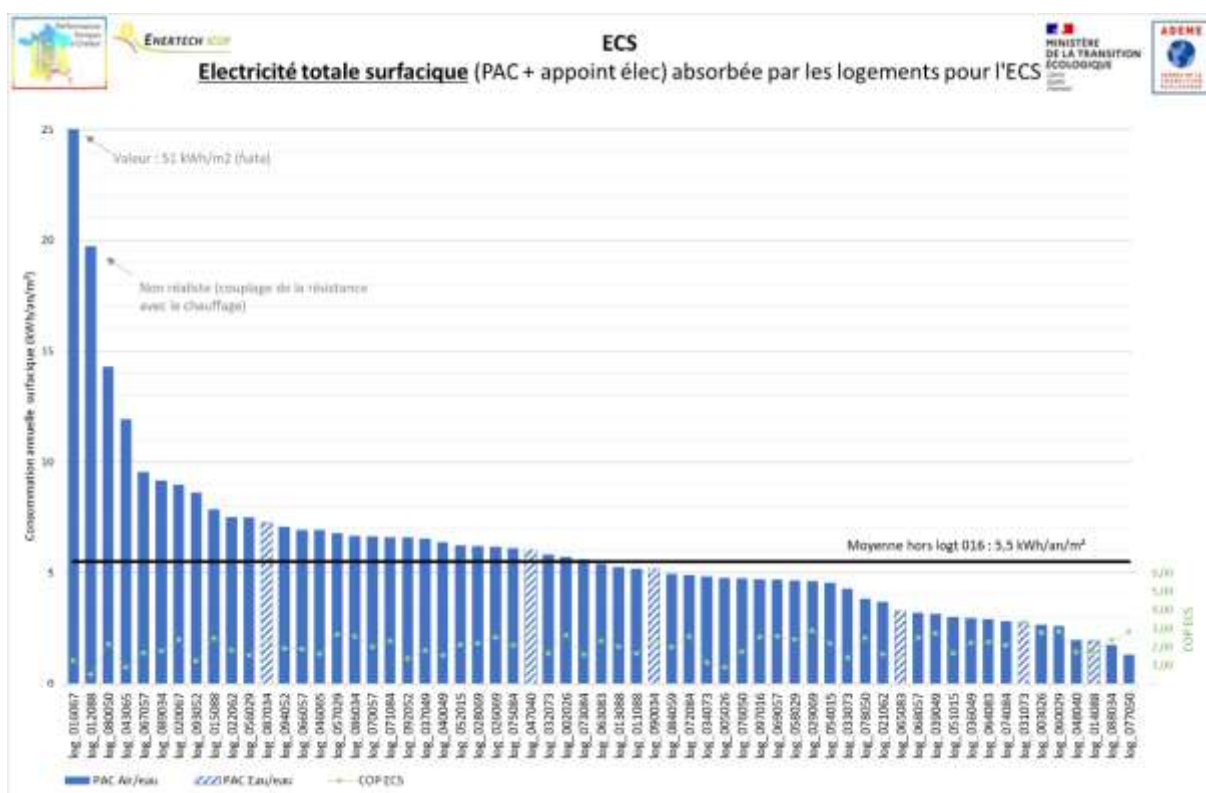


Figure 158 : Electricité totale surfacique consommée par les PAC pour l'ECS

3.2.4. Comparaison des consommations électriques du chauffage et de l'eau chaude sanitaire

La répartition de l'électricité consommée entre l'eau chaude sanitaire et le chauffage est présentée sur la Figure 159. L'électricité consommée pour le chauffage est toujours prépondérante sur celle de l'ECS, mais dans une proportion moins élevée que pour la chaleur (facteur 4), du fait de la plus faible valeur du SCOP ECS.

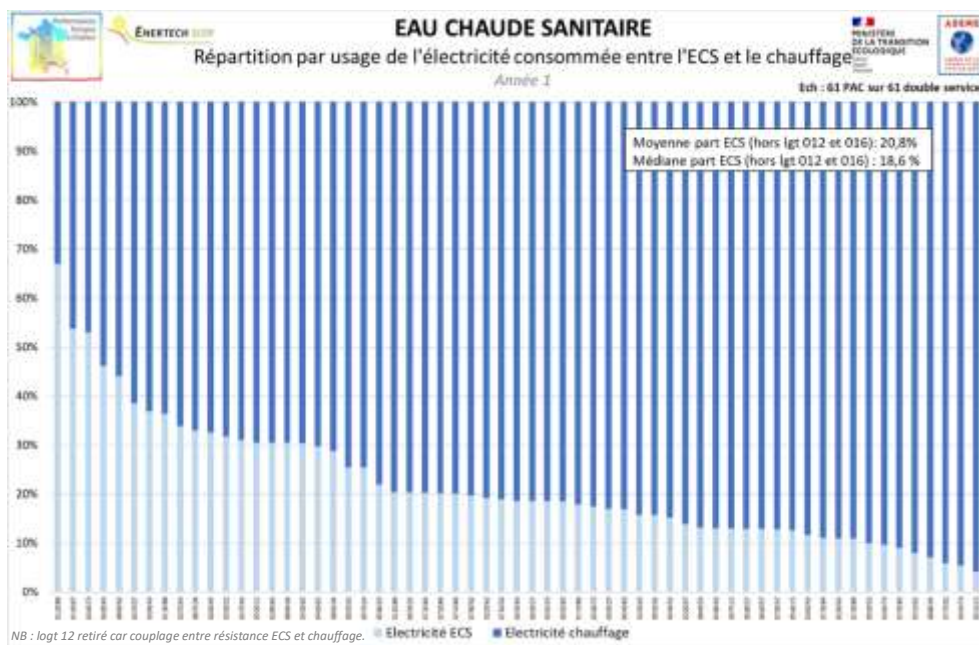


Figure 159 : Répartition de l'électricité consommée entre l'ECS et le chauffage

4. Résultats sur le rafraîchissement

Le rafraîchissement est une possibilité technique offerte par les PAC air/eau réversibles et les PAC eau/eau en général, à condition dans les deux cas de disposer d'un réseau d'émission adéquat (plancher chauffant, ventilo-convecteur, plafond rayonnant ou batterie sur CTA) :

- Rafraîchissement actif²⁶ pour les PAC air/eau réversibles (qui constituent un peu plus de 80% des PAC air/eau de l'échantillon) ou les PAC eau/eau réversibles (3 cas sur les 10 PAC eau/eau de l'échantillon) ;
- Rafraîchissement passif²⁷ c'est-à-dire géocooling, natural cooling, freecooling etc. (7 cas sur les 10 PAC eau/eau de l'échantillon).

Le rafraîchissement est ainsi « techniquement » possible - d'un point de vue PAC et émetteurs - sur 25 logements de l'échantillon : 16 en PAC air/eau et 9 en PAC eau/eau (2 cas eau/eau en froid actif et 7 cas eau/eau cas en froid passif).

On ne dénombre pourtant que **très peu d'utilisation effective du rafraîchissement** (actif ou passif) dans nos mesures durant les étés 2024 et 2025.

²⁶ Fonctionnement du compresseur avec inversion du cycle frigorifique pour permettre la production de froid.

²⁷ Simple circulation d'une boucle d'eau (ou eau glycolée) entre le sol ou l'eau de nappe et les émetteurs du logement.

Les 10 cas concernés, 3 en PAC air/eau et 7 en PAC eau/eau, sont reportés dans le Tableau 17.

Lgt	Surface habitable	Zone climatique	Type de PAC	Type de Rafraîchissement	Emetteurs	Régime de T°C	été 2024			été 2025		
							Conso. Élec.	Froid produit	EER global	Conso. Élec.	Froid produit	EER global
001026	185 m2	H2d	air/eau	actif	Plancher	19,0°C	0,0 kWhél/m2	0,0 kWhut/m2	-	0,2 kWhél/m2	0,4 kWhut/m2	1,9
002026	168 m2	H2d	air/eau	actif	Plancher et radia.	15,0°C	2,9 kWhél/m2	5,5 kWhut/m2	1,9	0,2 kWhél/m2	0,4 kWhut/m2	2,0
075084	122 m2	H2d	air/eau	actif	Ventilo-convecteur	7,5°C	13 kWhél/m2	23 kWhut/m2	1,8	11 kWhél/m2	19 kWhut/m2	1,8
018067	214 m2	H1b	eau/eau	actif	Plancher	13,0°C	0,3 kWhél/m2	1,1 kWhut/m2	3,7	0,7 kWhél/m2	3,0 kWhut/m2	4,5
019067	176 m2	H1b	eau/eau	actif	Plancher	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
034073	115 m2	H1c	eau/eau	géocooling	Plancher	17,5°C	0,3 kWhél/m2	7,3 kWhut/m2	24	0,3 kWhél/m2	7,1 kWhut/m2	24
040049	127 m2	H1b	eau/eau	géocooling	Plancher	20,5°C	0,1 kWhél/m2	1,1 kWhut/m2	8,3	0,5 kWhél/m2	3,2 kWhut/m2	6,7
045065	165 m2	H2c	eau/eau	géocooling	Plancher	17,5°C	0,9 kWhél/m2	12 kWhut/m2	13	0,7 kWhél/m2	12 kWhél/m2	17
046065	370 m2	H2c	eau/eau	géocooling	Plancher	19,0°C	ND	9,5 kWhut/m2	ND	ND	ND	ND
073084	408 m2	H2d	eau/eau	géocooling	Plancher et radia.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND : mesure non disponible (causes possible : débranchement des appareils de mesure en été ; géocooling non instrumenté car hydrauliquement séparé ; logement désinstrumenté, etc.)

Tableau 17 : Consommations d’électricité et production de froid mesurés pour la climatisation et le rafraîchissement, étés 2024 et 2025.

On dénombre parmi ces 10 logements 5 cas de froid actif et 5 cas de géocooling :

- Sur les cas de géocooling les besoins utiles mesurés par les compteurs de chaleur²⁸ sont de 7,5 kWhut/m² en moyenne en 2024 et en 2025 (min 1,1 max 12 kWhut/m²). Les consommations électriques associées sont – de manière logique - extrêmement faibles avec 0,5 kWhél/m² de consommation moyenne en 2024 et en 2025. Les EER sont donc spectaculaires avec une moyenne autour de 15 et un maximum mesuré à 24 !
- Sur les cas de froid actif la moyenne de consommation observée est de 3,6 kWhél/m², ce qui est faible également. Un cas se détache clairement : le logement 075084 qui a beaucoup climatisé en 2024 et en 2025 (volonté affichée d’avoir la climatisation dans chaque pièce grâce à l’installation de ventilo-convecteurs) avec un besoin moyen de 21 kWhut/m² et une consommation associée de 12 kWhél/m². Le 2^e cas significatif est le logement 002026 mais uniquement durant l’été 2024 et avec une consommation 4 fois inférieure à celle du logement 075084. Les autres cas sont anecdotiques. On note que **les EER de production sont mesurés en moyenne à 4,1 en eau/eau** (2 saisons de chauffe mesurées sur 1 logement) **et 1,9 en air/eau** (5 saisons de chauffe mesurées sur 3 logements).

Si le nombre de cas est trop faible pour pouvoir conclure, on peut avancer l’hypothèse que l’EER de production en froid actif est plus dispersé entre les PAC air/eau et eau/eau que ne l’est le SCOP de chauffage, ce qui pourrait s’expliquer par un écart de température des deux types de sources plus important en été qu’en hiver.

Les consommations de froid étant faibles, elles sont aussi très sensibles aux aléas des paramètres d’influence (variation d’occupation, confort ressenti en période de canicule, variation des apports internes, gestion des occultations solaires, etc.), ce qui explique la variabilité des consommations pour un même logement, comme le montre le cas du logement 002026 : consommation de 2,9 kWhél/m² durant l’été 2024 et 0,2 kWhél/m² durant l’été 2025 alors que les indices de rigueur de deux étés sont respectivement de 0,95 et 1,21 (été 2025 plus chaud) !

Les graphiques en Figure 160 et Figure 161 montrent les conditions d’ambiance maintenues dans les logements 002026 (PAC air/eau sur plancher) et 075084 (PAC air/eau sur ventilo-convecteurs) en fonction de la température extérieure, ainsi que les puissances de froid utile appelées.

²⁸ Dans la quasi-totalité des cas (1 cas faisant exception sur du géocooling), le compteur de chaleur installé pour mesurer la production utile de chauffage était aussi capable de mesurer la production de froid (comptage bidirectionnel en température).

On constate sur ces données que les niveaux d'ambiance maintenues dans ces logements ne sont absolument pas spectaculaires : entre 25°C et 30°C lorsqu'il fait plus de 30°C dehors. Ces températures sont couramment atteintes dans la plupart des logements sans avoir besoin de recourir à un système de rafraîchissement. On en déduit que la climatisation dans ces deux cas vient plutôt corriger une forme de « défaillance » de la gestion du confort d'été, soit constructive (c'est le cas du logement 002026 avec une façade vitrée toute hauteur sur deux niveaux) soit comportementale (fenêtre laissées ouvertes ? Rayonnement solaire mal occulté ? Autre ?), plutôt que satisfaire un désir de confort particulièrement exigeant.

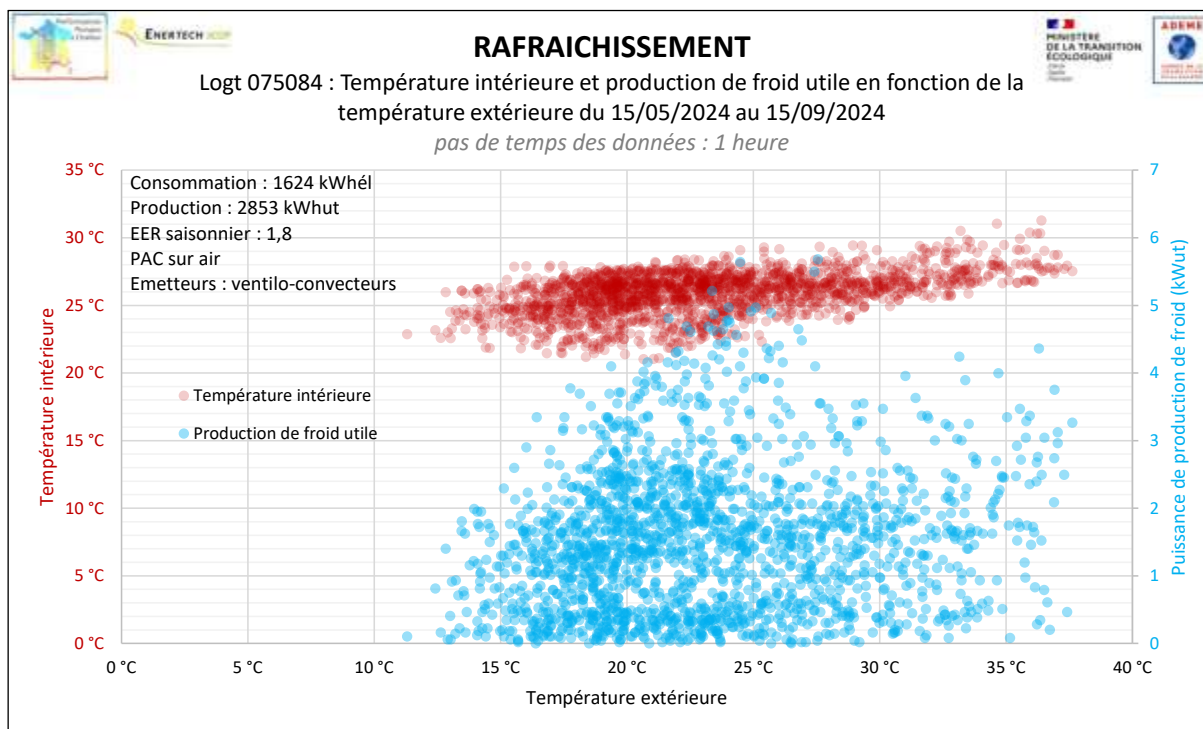


Figure 160 : Température intérieure et production de froid utile dans le logement 075084 – été 2024

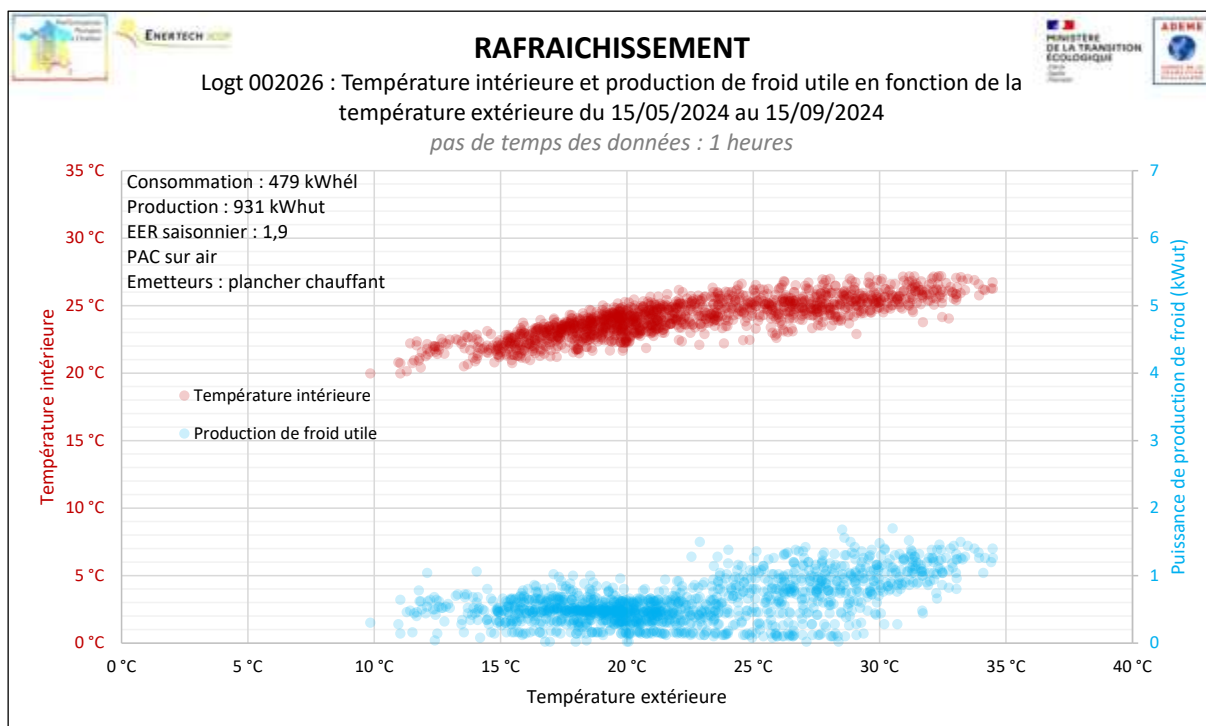


Figure 161 : Température intérieure et production de froid utile dans le logement 002026 – été 2024

En résumé sur le rafraîchissement :

- Seul 10% de l'échantillon a utilisé du rafraîchissement, alors que 25% avait la *possibilité technique* de le faire.
- Sur les données disponibles des logements ayant rafraîchi, seuls 5 logements ont dépassé une production utile de froid de 5 kWhut/m² sur au moins l'un des deux étés 2024 ou 2025. La moyenne des besoins de froid mesurés sur les données disponibles, tous logements et étés confondus, est de 7 kWhut/m². Pour comparaison le besoin de chaleur moyen de l'échantillon sur une saison de chauffage est de 77 kWhut/m² (cf. §2.2.2).
- Sauf cas exceptionnel les consommations restent donc très faibles, avec une moyenne de 0,5 kWhél/m² pour le géocooling et 3,6 kWhél/m² pour le froid actif. Ces consommations sont assez nettement inférieures, par exemple, aux consommations de l'usage ECS.
- Les EER de production de froid des PAC air/eau s'établissent en moyenne à 1,9 sur les données disponibles (min 1,8 ; max 2,0), ce qui est assez nettement inférieur aux SCOP mesurés sur le chauffage : 1,2 points de moins pour le logement 001026, 0,3 points de moins pour le logement 002026 et 0,9 points de moins pour le logement 075084.

5. Part de la pompe à chaleur dans le général électrique

La part de la consommation électrique de la PAC dans le général des logements est présentée sur la Figure 162 en valeur absolue et surfacique.

La consommation de la PAC représente environ la moitié de la consommation totale des logements. Plus précisément, cette part vaut 47% pour les PAC simple service, et 58% dans le cas des double-service (46% pour le chauffage et 12% pour l'ECS).

La consommation électrique de la PAC vaut en moyenne sur notre échantillon 4 264 kWh_{el} pour 3 986 kWh_{el} de consommation hors PAC. En valeur surfacique, la PAC consomme 32 kWh_{el}/m² d'électricité par an pour une consommation hors PAC de 29 kWh_{el}/m².

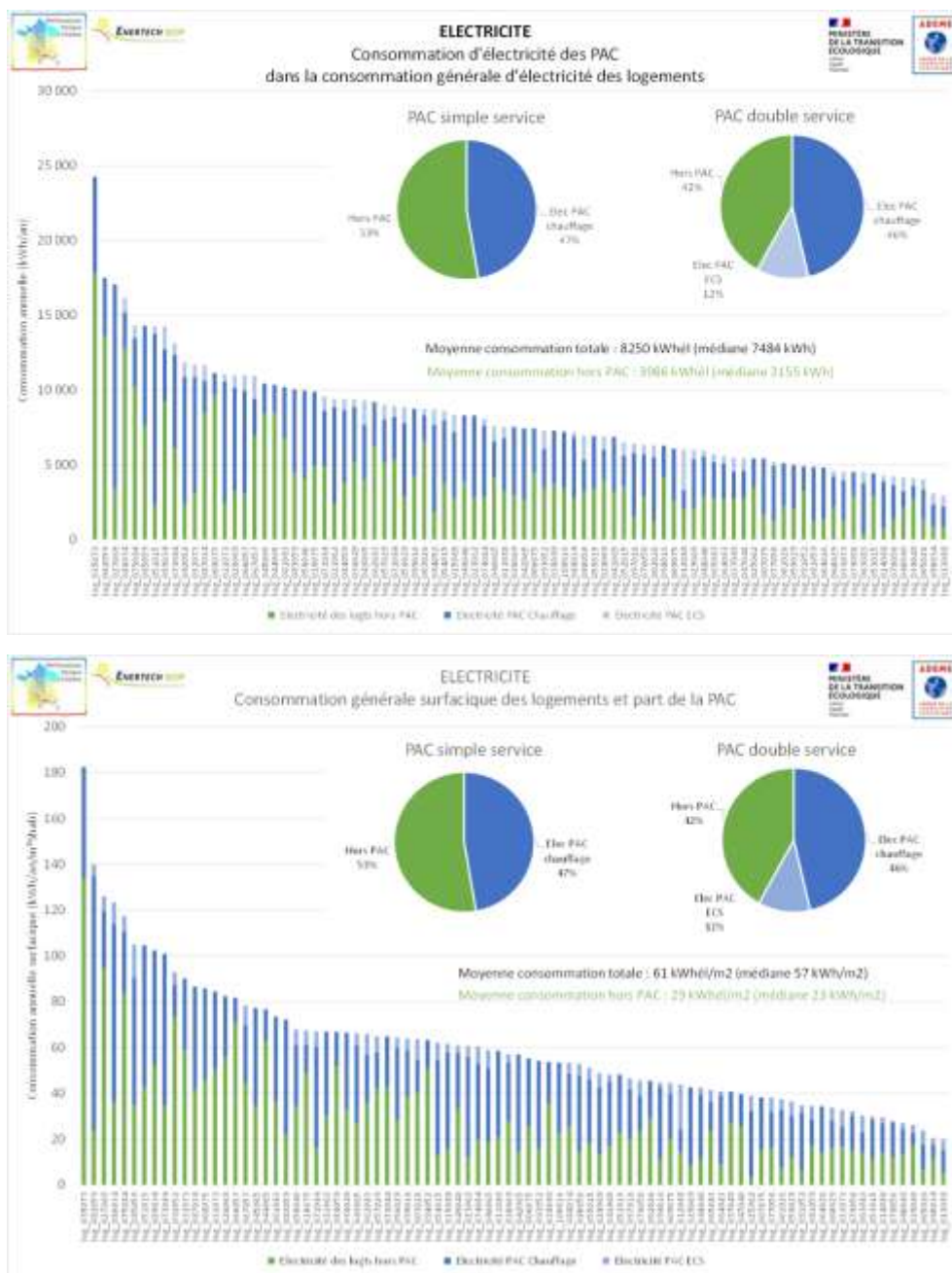


Figure 162 : Part de la consommation d'électricité des PAC dans le général des logements (en valeur absolue et surfacique)

Lors de la vague de froid du 20 janvier 2024, le pic d'appel de puissance électrique des PAC a conduit, en moyenne, à une multiplication par 3,5 du général des logements à cet instant (passant de 1000 W_{él} à 3500 W_{él}), comme illustré sur la Figure 163.

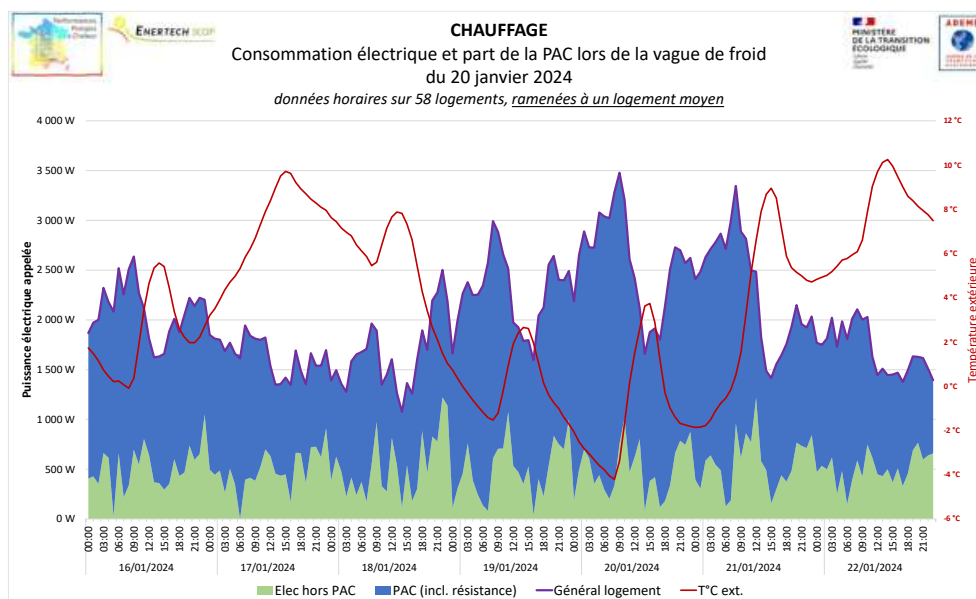


Figure 163 : Puissance électrique appelée par la PAC et le général des logements lors de la vague de froid du 20 janvier 2024

6. Temps de retour financier d'une PAC

Nous proposons dans cette partie d'évaluer le temps de retour financier de l'installation d'une PAC avec une méthode de calcul simple mais reposant sur des données réelles :

- Coûts d'installation réels des logements de l'échantillon (83 logements) ;
- Montants d'aides réellement perçus (76 logements) ;
- Besoin de chauffage réel mesuré dans les logements ;
- Consommation électrique réelle mesurée sur les PAC ;
- Calcul pour le scénario « chaudière gaz » et les coûts des énergies et de maintenance (voir hypothèses ci-dessous) ;
- Hypothèse de coût des énergies et des abonnements constants (données 2025) ;
- Pas d'actualisation financière ;
- Pas d'amortissement (pas de prise en compte des durées de vie).

Les hypothèses concernant le coût des énergies, le scénario « chaudière gaz » (consommation électrique, rendements de production, coût d'une chaudière gaz) et les coûts de maintenance sont présentées dans le Tableau 18.

		Prix kWh (mis à jour le 11/03/2025)	Abonnement	
Coût kWh utile	Electricité tarif base	0,202 €/kWh	3,20 €/mois	Surcoût abonnement +3 kVA
	Electricité HP/HC HP	0,215 €/kWh	3,00 €/mois	
	Electricité HP/HC HC	0,169 €/kWh	3,48 €/mois	
	Electricité tempo Bleu HP	0,155 €/kWh		
	Electricité tempo Blanc HP	0,179 €/kWh		
	Electricité tempo Rouge HP	0,659 €/kWh		
	Electricité tempo Bleu HC	0,129 €/kWh		
	Electricité tempo Blanc HC	0,145 €/kWh		
	Electricité tempo Rouge HC	0,152 €/kWh		
	Gaz (<6000)	0,150 €/kWh	9,53 €/mois	
Gaz (>6000)	0,121 €/kWh	23,12 €/mois		
Conso élec chaudière gaz		200 kWh/an		
Rendement chauffage chaudière gaz		82%		
Rendement ECS chaudière gaz		72%		
Installation nouvelle chaudière gaz		8 736,00 €		
Maintenance annuelle PAC		200 €		
Maintenance annuelle gaz		150 €		

Tableau 18 : Présentation des hypothèses du calcul de temps de retour sur investissement

Les temps de retour financiers en déduisant du coût d'achat les aides sont présentés en Figure 164 :

- A gauche, pour le cas du remplacement d'une chaudière gaz « qui fonctionne » par une PAC (le coût d'installation de la PAC est à recouvrer dans son intégralité).
- A droite, pour le cas du remplacement d'une chaudière gaz par une PAC au lieu d'installer une nouvelle chaudière gaz neuve (seule la différence de coût entre l'installation d'une PAC et d'une chaudière gaz est à retrouver).

La Figure 165 présente ces résultats sans déduction des aides.

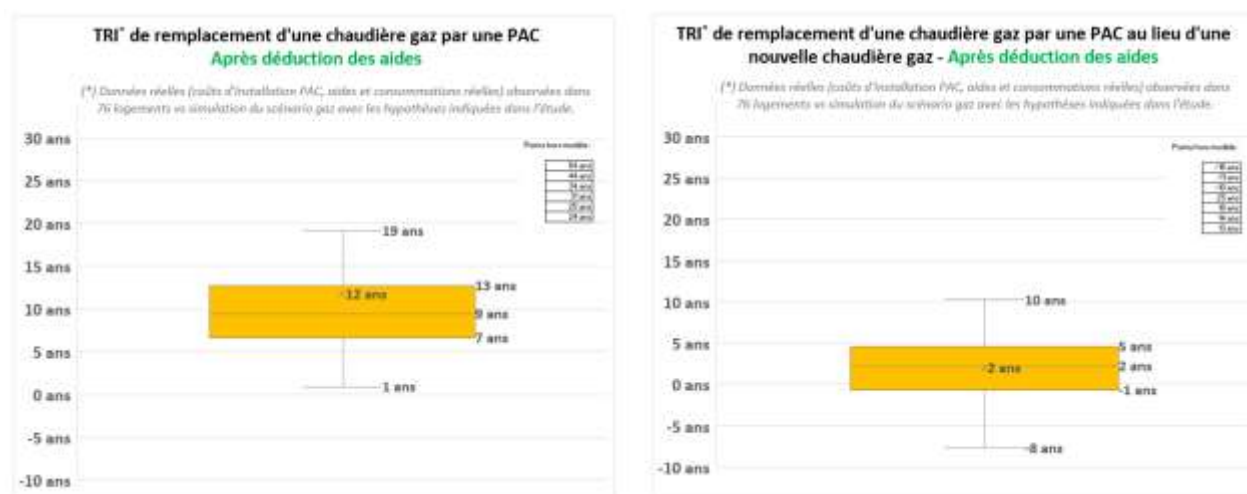


Figure 164 : Temps de retour sur investissement du remplacement d'une chaudière gaz par une PAC après déduction des aides

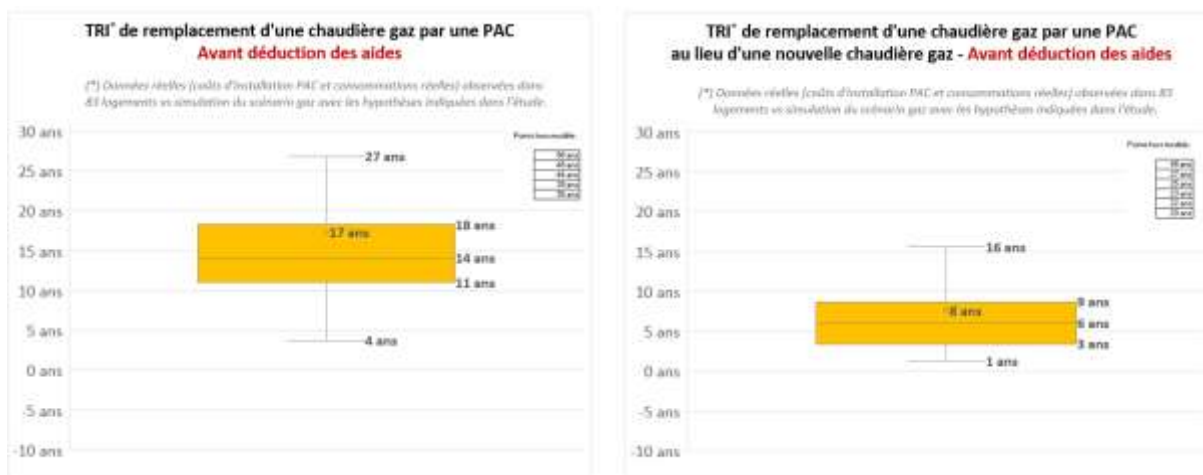


Figure 165 : Temps de retour sur investissement du remplacement d'une chaudière gaz par une PAC sans déduction des aides.

Les résultats montrent que :

- Le temps de retour financier de remplacement d'une chaudière gaz « qui fonctionne » par une PAC (dans le sens où le coût d'installation de la PAC est à regagner en intégralité) vaut 9 ans en médiane (12 ans en moyenne) avec les aides. Sans les aides, ce TRI monte à 14 ans en médiane (17 ans en moyenne).
- Le temps de retour du remplacement d'une chaudière gaz par une PAC plutôt qu'une nouvelle chaudière gaz (dans le sens où seule la différence de coût entre l'installation d'une PAC et d'une chaudière gaz est à regagner) vaut 2 ans en médiane et en moyenne avec les aides. Sans les aides, le TRI monte à 6 ans en médiane (8 ans en moyenne).

A partir des données simulées sur les logements de l'échantillon, nous traçons des abaques, présentés en Figure 166.

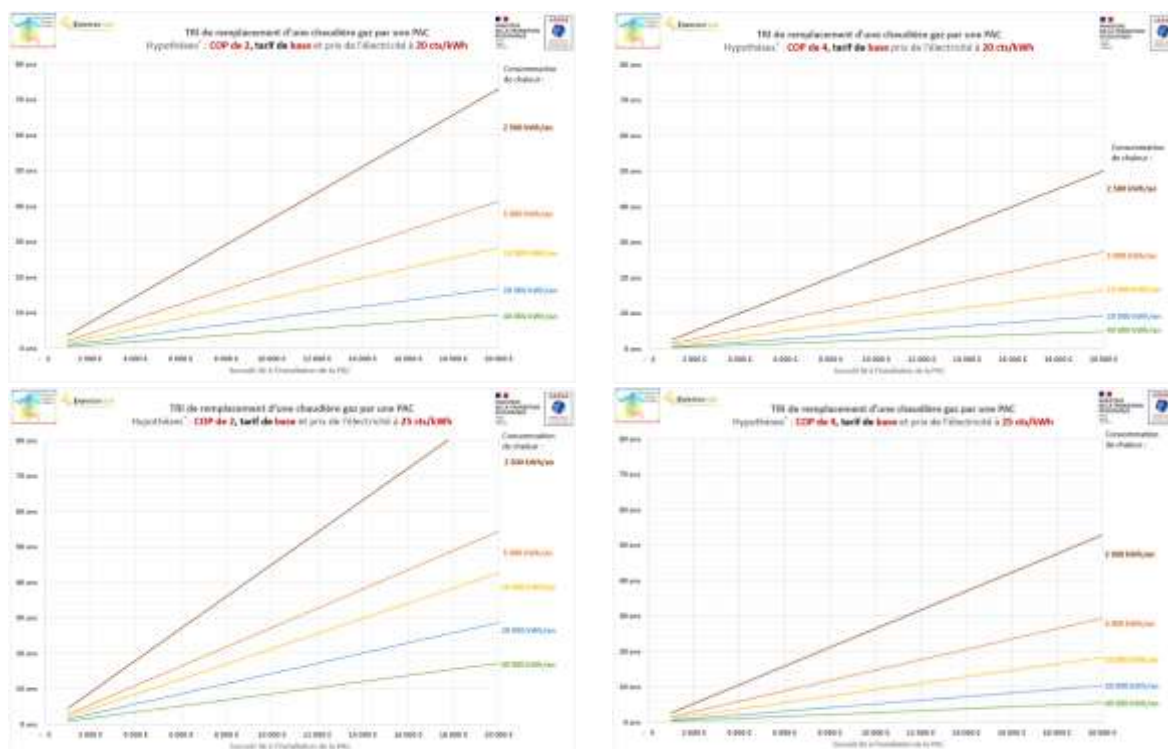


Figure 166 : Abaques déduits des simulations de TRI du remplacement d'une chaudière gaz par une PAC sur les logements.

Sans surprise, les résultats sont très sensibles au SCOP considéré. Par exemple, sur un cas médian d'une consommation de chaleur de 10 000 kWh/an, de 10 000€ de reste à charge et une électricité à 20 cts€/kWh, pour un SCOP de 2, le TRI est de 14 ans alors qu'avec un SCOP de 4, le TRI chute à 8 ans.

Conclusion sur l'étude du temps de retour sur investissement

L'étude du temps de retour sur investissement de l'installation d'une PAC en remplacement d'une chaudière gaz est **très sensible aux hypothèses**.

Sur notre échantillon de logement, le **surcoût lié au remplacement d'une chaudière gaz par une PAC plutôt que par une nouvelle chaudière gaz est amorti en 2 ans après déduction des aides**. Sans les aides, le TRI se situe plutôt autour de 6 ans (valeur médiane).

Les simulations sur les logements permettent de dresser des abaques. Elles confirment l'influence centrale du SCOP dans la diminution du TRI de l'installation d'une PAC, d'où **la nécessité de limiter la dispersion des SCOP observée sur le terrain et de tout mettre en œuvre pour maximiser la performance réelle, afin de permettre aux usagers de rentrer dans leurs frais le plus rapidement possible**.

PARTIE 3 : CONFRONTATION DES MESURES A LA REGLEMENTATION ET AUX AUTRES CAMPAGNES EUROPEENNES

1. Comparaison au calcul 3CL (DPE)

1.1. Rappel sur le calcul 3CL

Le DPE a pour but d'évaluer la performance énergétique et climatique d'un logement ou d'un bâtiment. Il doit être effectué à l'initiative du propriétaire bailleur ou du propriétaire vendeur pour informer le futur locataire ou acquéreur sur les charges énergétiques du logement et recommander des travaux²⁹.

Le DPE affiche le bilan annuel des consommations de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de refroidissement, d'éclairage et des auxiliaires. Il contient aussi une estimation des émissions de gaz à effet de serre associées aux consommations des 5 usages précédents.

Le résultat final qualifie le logement selon deux critères (voir Figure 167) :

- La consommation énergétique du logement est positionnée sur une échelle de note allant de A (logement économe) à G (logement énergivore). L'unité utilisée est l'énergie primaire³⁰ ramenée à la surface habitable : kWh_{ep}/m²SHAB.an.
- Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont, elles aussi, classées sur une échelle de note allant de A (faible niveau GES) à G (forts rejets de GES). L'unité utilisée est le kilogramme équivalent de CO₂ par surface habitable : kgCO₂eq/m²SHAB.an.

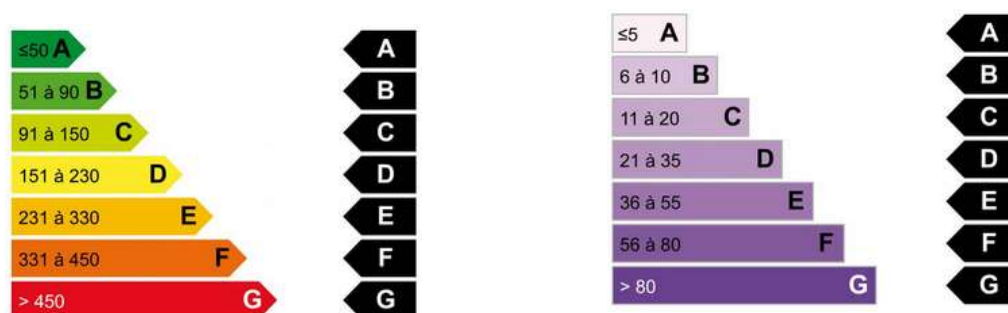


Figure 167 : Echelles des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre du DPE

Le calcul de la consommation de chauffage est encadré par des conventions établies sur la météo, le confort interne, les apports gratuits, l'ensemble du système de chauffage et le calcul des déperditions. Les consommations et besoins de chauffage réels, mesurés dans le cadre de cette opération dans chaque logement, peuvent grandement différer de ces calculs conventionnels.

1.1.1. Bases du calcul 3CL pour déterminer le besoin de chauffage

La consommation d'énergie pour le chauffage en mono-générateur pompe à chaleur se définit dans le DPE par la formule suivante : $C_{ch} = B_{ch} \times I_{ch} \times INT$, avec :

- B_{ch} : le besoin annuel de chauffage :

²⁹ <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F16096>

³⁰ Coefficient d'énergie primaire le DPE à la date de ce rapport : 2,3 pour l'électricité, 1 pour les autres énergies.

- o Le besoin annuel de chauffage (Bch) est égal à la somme des besoins mensuels (Bch_j) sur la période de chauffe : $Bch = \sum Bch_j$, avec

$$Bch_j = BV_j * DHC_j / 1000 - (Q_{recchauffj} + Q_{g,wrecj} + Q_{genrecj}) / 1000, \text{ avec :}$$

- ❖ $Q_{recchauffj}$: pertes récupérées de distribution d'ECS pour le chauffage sur le mois j (Wh)
- ❖ $Q_{g,wrecj}$: pertes récupérées de stockage d'ECS pour le chauffage sur le mois j (Wh)
- ❖ $Q_{gen_rec_j}$: pertes récupérées de génération pour le chauffage sur le mois j (Wh)
- ❖ DHC_j : degrés-heures de consigne (DPE : 19°C) sur le mois j (en Kelvin heure K.h)

DH19 (°Ch)	Altitude ≤400m							
	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
Janvier	11712,4	10180,7	10855,3	9307,3	9119,8	9812,8	10042,0	9264,6
Février	9966,8	8874,7	9690,3	9402,9	9503,7	7883,1	8913,2	6041,6
Mars	7922,7	8207,7	7369,8	7252,2	7178,0	6489,1	6834,6	6118,4
Avril	5877,4	5914,4	5072,2	5896,3	5583,5	4888,0	4193,0	3445,8
Mai	2762,0	3555,9	2340,3	3619,8	3506,8	121,4	877,2	-
Juin	-	104,7	410,0	880,2	824,0	-	-	-
Juillet	-	-	-	-	-	-	-	-
Aout	-	-	-	-	-	-	-	-
Septembre	2264,1	215,8	-	1608,5	-	1388,2	-	-
Octobre	3645,4	4109,7	3330,7	4334,8	3722,0	2804,7	1788,4	911,8
Novembre	6861,0	8473,8	7720,0	6404,0	7387,1	6725,2	6851,3	6044,6
Décembre	9573,3	10452,5	10884,4	8679,6	9081,0	9535,9	15639,4	7659,1

Figure 168 : Valeurs des degrés-heures du DPE pour chaque mois de l'année et zone climatique

- ❖ BV_j : besoin de chauffage d'un logement en W par kelvin sur le mois j : $BV_j = GV * (1 - F_j)$, avec :
 - GV : déperditions de l'enveloppe en W/K

$$GV = DP_{mur} + DP_{plancher_bas} + DP_{plancher_haut} + DP_{menuiserie} + PT + DR$$

- PT : déperditions par les ponts thermiques (W/K)
- DR : déperditions par le renouvellement d'air (W/K)
- DP_{paroi} : déperdition par la paroi (W/K)
 - F_j : fraction des besoins de chauffage couverts par les apports gratuits sur le mois j.

Inertie	F_j
Lourde / Très Lourde	$\frac{X_j - X_j^{3,6}}{1 - X_j^{3,6}}$
Moyenne	$\frac{X_j - X_j^{2,9}}{1 - X_j^{2,9}}$
Légère	$\frac{X_j - X_j^{2,5}}{1 - X_j^{2,5}}$

$$X_j = \frac{As_j + Ai_j}{GV * DH_j}$$

Figure 169 : Formule de calcul du coefficient F_j selon l'inertie du logement

- l_{ch} : Inverse du rendement de l'installation : $l_{ch} = 1 / (SCOP * Re * Rd * Rr)$, avec :
 - o $SCOP$: Coefficient de performance PAC saisonnier.

- Le SCOP considéré dans le calcul peut provenir de 2 sources. S'il est connu, le SCOP peut être celui certifié par l'ERP EN 14825 (dont les détails sont présentés dans la partie suivante). Sinon, un tableau de SCOP forfaitaires est proposé (voir Figure 170).

A noter, la détermination du SCOP certifié par l'ERP nécessite de choisir une région climatique, et il manque aujourd'hui un tableau de correspondance entre les 8 régions climatiques réglementaires françaises (H1a à H3) et les 3 classes de l'ERP :

- A, Average ou climat moyen, avec -10°C de température de base et 4 910 heures de saison de chauffe.
- C, Cold ou climat froid, avec -20°C de température de base et 6 446 heures de saison de chauffe.
- W, Warm ou climat chaud, avec 2°C de température de base et 3 590 heures de saison de chauffe.

En pratique, la certification est demandée aux fabricants a minima pour la classe climatique A. Les classes climatiques C et W ont un caractère optionnel et leurs valeurs sont bien souvent absentes de la banque de données Keymark.

Type de PAC	Zone H1 et H2				
	Type d'émetteur	Avant 2008*	2008-2014	2015-2016	A partir de 2017
PAC Air/Eau	Autres	2,2	2,4	2,6	2,8
	Planchers / Plafonds	2,4	2,6	2,9	3,2
PAC Eau/Eau	Autres	2,2	2,4	2,7	3
	Planchers / Plafonds	2,4	2,6	3	3,3
PAC Eau glycolé/Eau	Autres	2,2	2,4	2,7	3
	Planchers / Plafonds	2,4	2,6	3	3,3
PAC Géothermie	Autres	2,2	2,4	2,7	3
	Planchers / Plafonds	2,4	2,6	3	3,3

Type de PAC	Zone H3				
	Type d'émetteur	Avant 2008*	2008-2014	2015-2016	A partir de 2017
PAC Air/Eau	Autres	2,5	2,8	3	3,2
	Planchers / Plafonds	2,9	3,1	3,5	3,8
PAC Eau/Eau	Autres	2,5	2,8	3,1	3,5
	Planchers / Plafonds	2,9	3,1	3,6	4
PAC Eau glycolé/Eau	Autres	2,5	2,8	3,1	3,5
	Planchers / Plafonds	2,9	3,1	3,6	4
PAC Géothermie	Autres	2,5	2,8	3,1	3,5
	Planchers / Plafonds	2,9	3,1	3,6	4

Figure 170 : SCOP forfaitaires des pompes à chaleur air/eau et eau/eau considérés dans le calcul 3CL

- Re : Rendement de l'émission. Valeurs tabulées : radiateur – 0,95 et plancher chauffant – 1.

Type d'émetteurs	Re
Convecteur électrique NFC, NF** et NF***	0,95
Panneau rayonnant ou radiateur électrique NFC, NF** et NF***	0,97
Autres émetteurs à effet joule	0,95
Soufflage d'air chaud	0,95
Plancher chauffant	1
Plafond chauffant	0,98
Autres équipements	0,95

Figure 171 : Rendements d'émission considérés dans le calcul 3CL

- R_d : Rendement de la distribution chauffage. Valeurs utilisées pour un réseau non isolé : de 0,88 à 0,91.

Type de distribution	Rd	
	Non isolé	Isolé
Pas de réseau de distribution	1	1
Réseau aéraulique	0,8	0,85
Réseau collectif eau chaude haute température ($\geq 65^\circ\text{C}$)	0,85	0,87
Réseau collectif eau chaude moyenne ou basse température ($< 65^\circ\text{C}$)	0,87	0,9
Réseau individuel eau chaude moyenne ou basse température ($< 65^\circ\text{C}$)	0,91	0,95
Réseau individuel eau chaude haute température ($\geq 65^\circ\text{C}$)	0,88	0,92

Figure 172 : Rendements de distribution du chauffage considérés dans le calcul 3CL

- R_r : Rendement de la régulation du système de chauffage. Valeurs utilisées : radiateur sans robinet thermostatique – 0,9, 0,95 avec et plancher chauffant – 0,95.

Type d'équipements	Rr
Convecteur électrique NFC, NF** et NF***	0,99
Panneau rayonnant ou radiateur électrique NFC, NF** et NF***	0,99
Autres émetteurs à effet joule	0,96
Plancher ou plafond rayonnant électrique avec régulation terminale	0,98
Plancher ou plafond rayonnant électrique sans régulation	0,96
Radiateur électrique à accumulation	0,95
Plancher ou plafond chauffant à eau en individuel	0,95
Plancher ou plafond chauffant à eau en collectif	0,9
Radiateur gaz à ventouse ou sur conduit de fumée	0,96
Poêle charbon / bois / fioul / GPL ou insert	0,8
Radiateur eau chaude sans robinet thermostatique	0,9
Radiateur eau chaude avec robinet thermostatique	0,95
Convecteur bi-jonction	0,9
Air soufflé	0,96

Figure 173 : Rendements de la régulation du système de chauffage considérés dans le calcul 3CL

- INT : Facteur d'intermittence : il traduit les baisses temporaires de température, réalisées pour différentes raisons, absence, ralenti de nuit et éventuellement de façon inégale dans les pièces. Il est égal au rapport entre les besoins réels, compte tenu d'un comportement moyen des occupants, et les besoins théoriques, avec :

$$INT = I_o / (1 + 0,1 \cdot (G - 1)) \text{ et } G = GV \cdot H_{sp} \cdot SHAB, \text{ avec :}$$

- I_o : intermittence de base, spécifié par des abaques entre 0,8 à 0,94 pour les systèmes de chauffage rencontrés dans le projet (radiateur ou plancher chauffant).

La répartition de la consommation d'énergie pour le chauffage entre la pompe à chaleur et un insert / poêle à bois ou poêle à granulés se définit dans le DPE avec des facteurs de répartition de la façon suivante :

$$C_{ch} = 0,75 \cdot B_{ch} \cdot I_{ch \text{ pac}} \cdot INT_{pac} + 0,25 \cdot B_{ch} \cdot I_{ch \text{ poêle}} \cdot INT_{poêle}$$

Les coefficients de répartition de la consommation d'énergie pour le chauffage entre la pompe à chaleur, un insert / poêle à bois ou poêle à granulés et un radiateur sèche serviettes électrique dans la salle de bain valent dans le DPE :

$$C_{ch} = 0,75 \cdot 0,9 \cdot B_{ch} \cdot I_{ch \text{ pac}} \cdot INT_{pac} + 0,25 \cdot 0,9 \cdot B_{ch} \cdot I_{ch \text{ poêle}} \cdot INT_{poêle} + 0,1 \cdot B_{ch} \cdot I_{ch \text{ RSS}} \cdot INT_{RSS}$$

1.1.2. Prise en compte des apports gratuits

La fraction des besoins de chauffage couverte par les apports gratuits F_j utilisée dans le DPE vient d'une ancienne réglementation thermique : le Th-BV 1988. Les apports gratuits internes intègrent les appareils

électrodomestiques et les apports thermiques des occupants. Ils sont calculés en fonction de la surface et d'un scénario d'occupation. Les apports solaires sont évalués avec l'introduction d'une surface sud transparente « équivalente » et l'ensoleillement reçu sur cette surface sans ombrage. Le calcul détaillé de la surface sud équivalente exige une connaissance parfaite des surfaces, de l'inclinaison et des masques lointains des parois vitrées par façade.

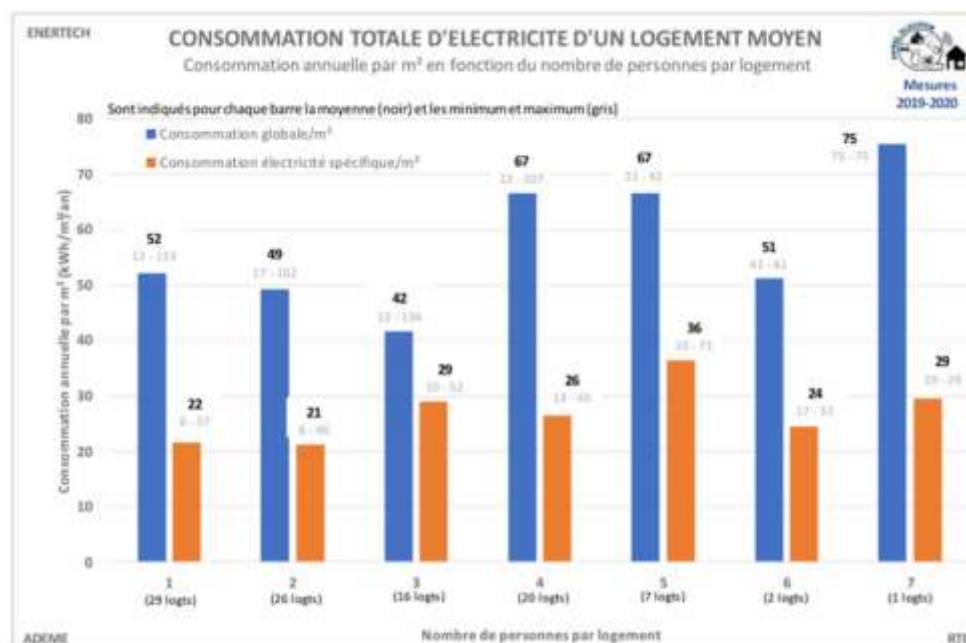
Faute d'un DPE exhaustif et d'un relevé précis des masques solaires et des surfaces vitrées par façade, nous proposons d'utiliser l'estimation simplifiée du Th-BV 1988 pour les apports internes, les apports solaires et le taux de récupération de ces énergies, évalués par les formules :

- As_j : apports solaires sur le mois j durant la période de chauffe (Wh) :

$$As_j = 1000 * Sse_j * E_j, \text{ avec :}$$

- Sse_j : « Surface transparente sud équivalente » du logement, c'est-à-dire la surface de paroi, fictive, exposée au sud, totalement transparente et sans ombrage, qui provoquerait les mêmes apports solaires que les parois du logement, pour le mois j (m^2), valeur figée dans le Th-BV 1988 à $0,028 \times$ la surface habitable, SHAB.
 - E_j : ensoleillement reçu, sur le mois j, par une paroi verticale orientée au sud en absence d'ombrage (kWh/m^2), valeurs Th-BV 1988 :
 - H1 : $410 \text{ kWh}/m^2$
 - H2 : $440 \text{ kWh}/m^2$
 - H3 : $460 \text{ kWh}/m^2$
- Ai_j : apports internes dans le logement sur le mois j (Wh) : les apports internes de chaleur dus aux équipements prennent en compte l'ensemble des équipements « mobiliers » (cuisson, audiovisuel, informatique, lavage, froid, appareils ménagers), les valeurs Th-BV 1988 sont :
 - H1 : $Ai = 22,9 \times \text{SHAB}$ en kWh
 - H2 : $Ai = 21,7 \times \text{SHAB}$ en kWh
 - H3 : $Ai = 18,1 \times \text{SHAB}$ en kWh

Afin d'avoir un point de comparaison avec cette source réglementaire plutôt ancienne, nous avons utilisé l'étude Panel Elecdom de mars 2021³¹.



³¹ Accessible sur la librairie de l'ADEME : <https://librairie.ademe.fr/batiment/4473-panel-usages-electrodomestiques.html>

Figure 174 : Consommation totale d'électricité d'un logement moyen, source Panel Elecdom année 1

L'étude Panel Elecdom ne différencie pas les apports électrodomestiques par région climatique (comme c'est le cas dans les règles de la Th-BV 1988) mais en fonction du nombre de personnes et de la surface habitable. La comparaison montre que pour un foyer de 1 à 2 personnes, les valeurs sont assez semblables avec celles du DPE. A partir de 3 personnes, les données Panel Elecdom montrent cependant une augmentation de la consommation électrodomestique qui n'est pas considérée dans le DPE (Figure 175).

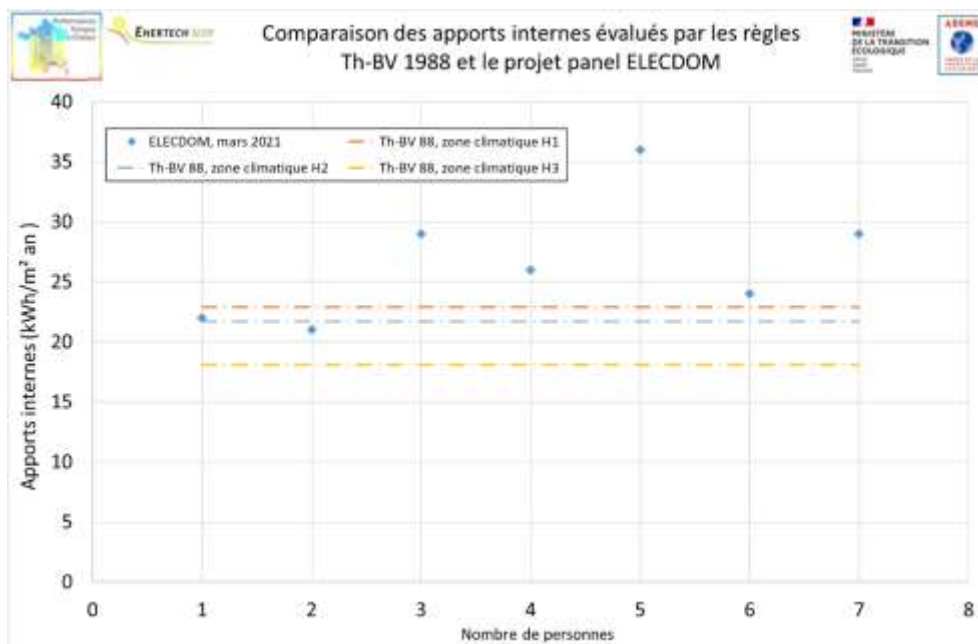


Figure 175 : Apports internes en fonction du nombre de personnes

1.2. Comparaison du besoin de chauffage du calcul 3CL à la mesure

1.2.1. Ecart constatés

L'objectif de cette partie est de comparer le besoin de chauffage évalué par le calcul 3CL (B_{ch}) avec celui mesuré dans chaque logement en conditions réelles (par le compteur de chaleur chauffage).

Etant donné que la PAC et son ballon d'eau chaude sont généralement en volume non chauffé, la formule du besoin de chauffage peut se simplifier et devient : $B_{ch} = (GV * DH * (1 - F)) * INT / R_{syst}$, avec :

- B_{ch} : besoin d'énergie thermique pour le chauffage
- GV : déperditions estimées par les diagnostiqueurs, en W/K
- DH : degrés-heures, correspondant à l'intégration de l'écart entre la température intérieure et la température extérieure. Le DPE fournit des météo conventionnelles et considère une température de 19°C dans les logements.
- F : fraction des besoins de chauffage couverts par les apports gratuits et calculés avec les valeurs du Th-BV 1988, base du DPE
- INT : Facteur d'intermittence, calcul suivant les règles du DPE
- R_{syst} : Produit des rendements de la distribution, de la régulation et de l'émission du système de chauffage, défini par les abaques du DPE

Remarque sur les appoints

Dans le cas du fonctionnement d'un appoint bois supplémentaire, le DPE considère, de manière forfaitaire, que celui-ci réduit de 25% la production de chaleur par la PAC. Pour un radiateur électrique sèche-serviettes dans la salle de bains, une réduction de 10% supplémentaire est prise en compte. Ces valeurs forfaitaires ont été appliquées dès qu'un logement de l'échantillon présentait un tel appoint.

Résultat

Le besoin de chauffage mesuré dans les logements de l'échantillon est en moyenne 28,1% inférieur aux valeurs calculées par le DPE. L'écart-type de 34,9% montre toute la diversité des logements de l'échantillon et l'approximation de la méthode de calcul simplificatrice du DPE. Les extrêmes font état d'une sous-évaluation du besoin de chauffage jusqu'à -87,1%, et d'une surévaluation jusqu'à +103,2%.

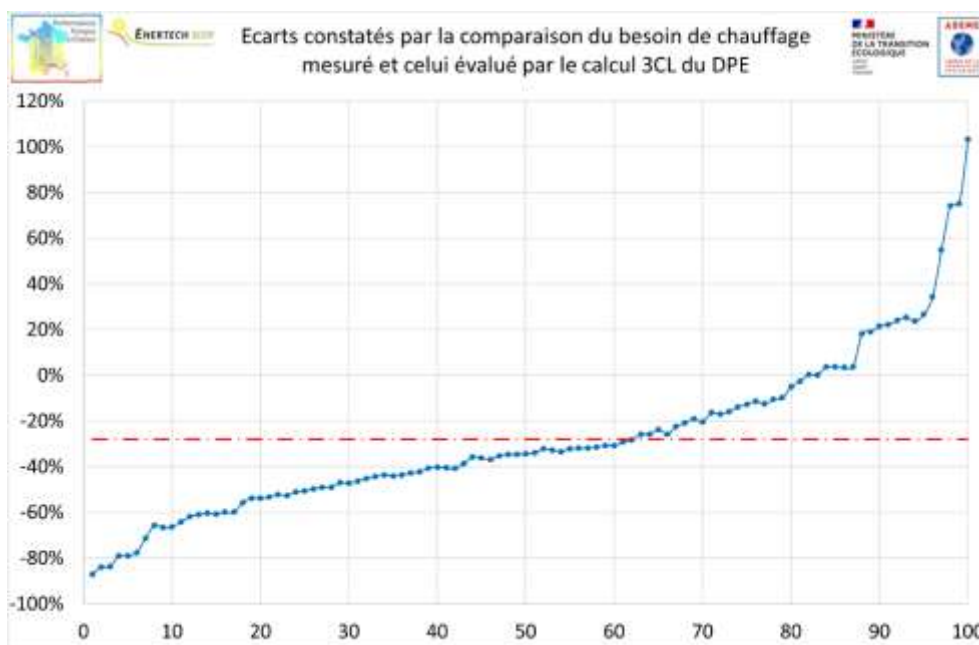


Figure 176 : Comparaison du besoin de chauffage mesuré et du besoin évalué par le calcul 3CL

L'exclusion des logements qui comportent un appoint de chaleur bois (soit 57 logements) réduit légèrement la moyenne et l'écart type, la moyenne de l'écart sans ces logements vaut 27,4% et l'écart type 33,5%.

1.2.2. Facteurs explicatifs

1.2.2.1. Focus sur les Degrés-heures

Pour évaluer l'importance des degrés-heures sur les écarts constatés, nous proposons de les recalculer avec les valeurs mesurées de température ambiante et de température extérieure afin de les comparer aux valeurs du DPE.

Pour évaluer la part de la météo, nous calculons des degrés-heures avec une température ambiante de 19°C (identique à celle prise en compte dans le DPE) et la température extérieure mesurée sur les logements.

(DH logement à 19°C / DH du DPE) - 1								
	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
MIN	-10.6%	-9.0%	-7.0%	-16.0%	-10.7%	-24.2%	-15.2%	-30.1%
MOY	-1.2%	7.5%	7.5%	-6.9%	-6.5%	-7.3%	-9.0%	-7.1%
MAX	8.8%	22.5%	35.0%	1.1%	-1.9%	11.0%	2.0%	10.1%
FR								

Figure 177 : Comparaison des degrés-heures calculés à 19°C avec la température extérieure mesurée et des degrés-heures du DPE

	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3	FR
MIN	-14.0°C	-12.5°C	-15.6°C	-6.0°C	-5.4°C	-7.5°C	-7.8°C	-9.1°C	-9.7°C
MOY	9.0°C	7.9°C	8.3°C	9.9°C	10.3°C	10.8°C	10.4°C	12.3°C	9.9°C
MAX	29.2°C	30.2°C	29.9°C	26.2°C	29.8°C	31.9°C	31.0°C	30.5°C	29.8°C
DPE	8.6°C	8.4°C	8.8°C	9.3°C	9.3°C	10.3°C	9.1°C	11.9°C	9.5°C

Figure 178 : Comparaison des températures extérieures mesurées et des valeurs du DPE

Les résultats présentés en Figure 177 et Figure 178 montrent que les degrés-heures calculés à 19°C d'ambiance sont 3% inférieurs aux degrés-heures conventionnels du DPE. La météo a donc été dans l'ensemble *légèrement* plus chaude que celle considérée dans le DPE. D'importantes disparités sont cependant observées au sein de chaque région climatique (avec des écarts allant de -30% jusqu'à +35%).

La Figure 179 compare les degrés-heures de la campagne de mesure *calculés* à 19°C avec les degrés-heures prenant en compte les températures ambiantes réelles. Il apparaît que ces derniers sont 8% supérieurs, ce qui indique que les températures ambiantes réelles sont plus élevées que les 19°C considérés dans le DPE (confirmé en partie 2, §2.2.1).

(DH réel logement / DH logement à 19°C) - 1									FR
	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3	
MIN	-17.7%	-19.0%	-6.1%	-2.6%	-5.4%	-16.8%	-10.3%	-6.6%	-10.6%
MOY	3.0%	8.1%	8.7%	4.3%	8.0%	10.4%	4.9%	16.9%	8.1%
MAX	28.7%	22.3%	27.8%	12.6%	20.6%	60.3%	12.2%	65.0%	31.2%

Figure 179 : Comparaison des degrés-heures de la campagne de mesure « repris à 19°C » avec les degrés-heures prenant en compte les températures ambiantes réelles

	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3	FR
nbr log PAC + bois	15	21	15	10	9	10	10	10	
MIN min	11.3°C	12.7°C	10.2°C	8.7°C	15.8°C	11.8°C	12.3°C	9.8°C	11.6°C
MOY min	17.2°C	16.9°C	18.6°C	18.9°C	18.6°C	17.5°C	18.1°C	19.0°C	18.1°C
MOY moy	19.5°C	20.2°C	20.3°C	19.5°C	20.0°C	20.2°C	19.9°C	20.7°C	20.0°C
MOY max	22.2°C	22.0°C	22.4°C	20.3°C	21.3°C	25.1°C	20.9°C	23.9°C	22.3°C
MAX max	28.4°C	27.3°C	27.1°C	26.2°C	26.6°C	30.4°C	32.1°C	27.5°C	28.2°C
DPE	19.0°C								19.0°C

Figure 180 : Températures ambiantes mesurées dans la campagne : statistiques par zone climatique et sur l'échantillon entier.

Les statistiques sur les ambiances réelles mesurées (Figure 180) montrent qu'à l'échelle nationale les écarts moyens entre les températures réelles et les 19°C du DPE sont de -1°C (18,1°C) à +3°C (22,3°C).

La Figure 181 compare enfin les degrés-heures se rapprochant le plus des conditions mesurées dans nos logements (avec les températures ambiante et extérieure mesurées) aux degrés-heures conventionnels du DPE. Les degrés-heures aux conditions mesurées sont en moyenne 5,1% supérieures aux valeurs conventionnelles du DPE. La météo réelle a été en moyenne plus froide que celle du DPE, et les conditions de confort intérieur plus chaudes que les 19°C conventionnels.

(DH réel logement / DH du DPE) - 1									FR
	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3	
MIN	-25.6%	-15.3%	-11.7%	-15.8%	-11.1%	-19.7%	-16.7%	-34.7%	-18.8%
MOY	2.0%	16.4%	16.8%	-2.8%	1.0%	2.4%	-4.6%	9.2%	5.1%
MAX	31.1%	39.1%	46.2%	12.7%	17.8%	58.5%	14.4%	64.9%	35.6%

Figure 181 : Comparaison des degrés-heures aux températures ambiante et extérieure mesurées aux degrés-heures du DPE

La Figure 182 synthétise les résultats de cette partie dédiée aux degrés-heures.

	Différence entre la chaleur mesurée et la chaleur DPE, part de la PAC dans le besoin de chauffage conventionnel	Différence entre la chaleur mesurée et la chaleur DPE, part de la PAC dans le besoin de chauffage conventionnel sans appoint bois	Différence entre la chaleur mesurée et la chaleur DPE, part de la PAC dans le besoin de chauffage mesurée	Différence entre la chaleur mesurée et la chaleur calculée avec les DJU mesurés , part de la PAC dans le besoin de chauffage conventionnel	Différence entre la chaleur mesurée et la chaleur calculée avec les DJU mesurés, part de la PAC dans le besoin de chauffage mesurée	Différence entre la chaleur mesurée et la chaleur calculée avec les DJU mesurés, part de la PAC dans le besoin de chauffage mesurée, sans appoint bois
min	-87,1%	-78,9%	-84,4%	-87,8%	-82,3%	-77,2%
moy	-28,1%	-27,4%	-28,0%	-31,7%	-33,9%	-30,7%
écart type	34,9%	33,5%	36,2%	34,1%	33,4%	35,1%
max	103,2%	103,2%	103,6%	157,4%	157,3%	157,3%

Figure 182 : Evolution de l'écart entre le besoin de chaleur mesuré et calculé, en fonction des hypothèses du DPE et des valeurs mesurées

1.2.2.2. Conclusion sur les paramètres explicatifs

La comparaison entre le besoin de chauffage calculé par le DPE et celui mesuré par notre instrumentation montre des écarts significatifs.

L'analyse des termes de la formule de calcul du DPE permet d'identifier plusieurs raisons pouvant expliquer cette différence :

- Les degrés-heures : une météo réelle différente de celle utilisée dans le DPE ou une température de confort différente de 19°C induit un écart entre les conditions réelles et conventionnelles. La comparaison des DH montre que les degrés-heures réels mesurés ont été en moyenne 5% supérieurs aux valeurs conventionnelles du DPE.
- Les parts forfaitaires de 25% du besoin de chauffage total couvert par l'appoint bois et de 10% pour les sèches serviettes n'ont pas une influence de premier ordre au global, puisque l'écart ne s'améliore pas sensiblement en considérant les consommations de bois déclarées par les occupants. Par contre, en rentrant dans le détail de chaque logement, la différence peut se montrer très significative avec ces parts forfaitaires.
- Les apports internes pris en compte avec le Th-BV 1988 dans les calculs DPE peuvent être questionnés et comparés à la réalité, aux habitudes des occupants dans l'utilisation des appareils électro-domestiques, des volets, de l'orientation du bâtiment et son inertie. La prise en compte des apports internes de l'étude Panel Elecdom n'améliore pas très sensiblement la précision du calcul par comparaison aux mesures (amélioration de l'écart-type).
- La comparaison entre le besoin de chaleur mesuré et celui évalué par le calcul du DPE affiche une surestimation globale 30% du calcul DPE. L'injection des données localement mesurées ou estimées, comme les températures mesurées ou les consommations d'énergie des appoints bois, augmentent légèrement l'écart moyen et les extremums. La surestimation DPE, s'étalant de 27% à 34% selon les hypothèses de comparaison, se trouve dans l'estimation des déperditions par les diagnostiqueurs (facteur GV), le rendement réel de l'ensemble du système de chauffage central et le facteur d'intermittence.

1.3. Comparaison du SCOP du calcul 3CL à la mesure

Pour rappel, le SCOP considéré dans le calcul 3CL peut provenir de 2 sources. S'il est connu, le SCOP peut être celui certifié par l'ERP EN 14825. Sinon, un tableau de SCOP forfaitaires est proposé (voir Figure 170). C'est l'écart entre les SCOP mesurés et ces valeurs tabulées par défaut du DPE que nous évaluons dans cette partie.

1.3.1. Ecart constatés

La Figure 183 présente l'écart entre le SCOP mesuré et le SCOP par défaut du DPE.

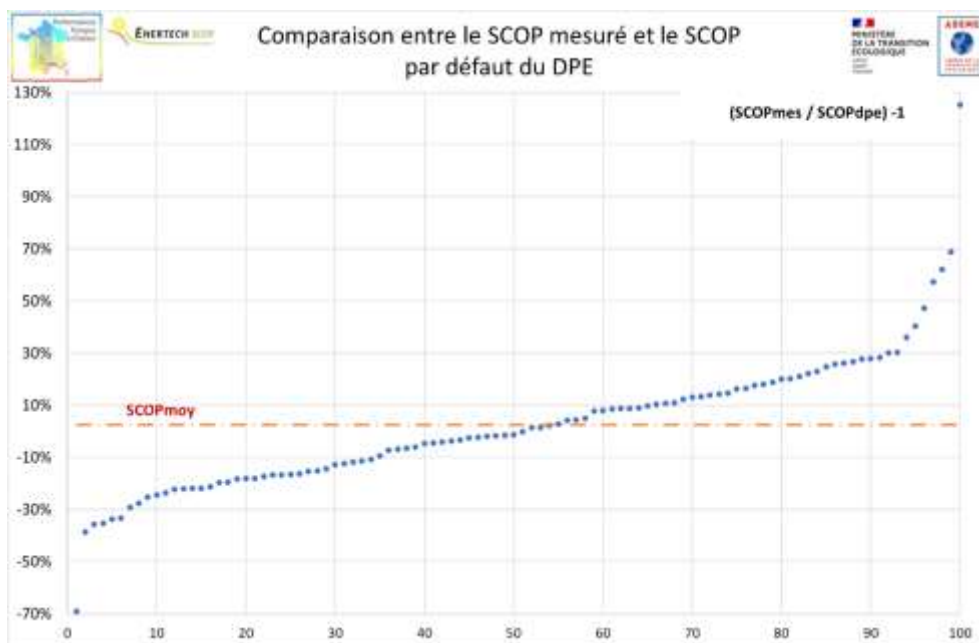


Figure 183 : Ecart entre le SCOP mesuré et le SCOP par défaut du DPE

Le SCOP mesuré est en moyenne 2,4% supérieur au SCOP du DPE. Ceci est en moyenne un très bon résultat, même si l'écart type reste haut à 26%. Le résultat montre la disparité importante existante avec les installations réelles.

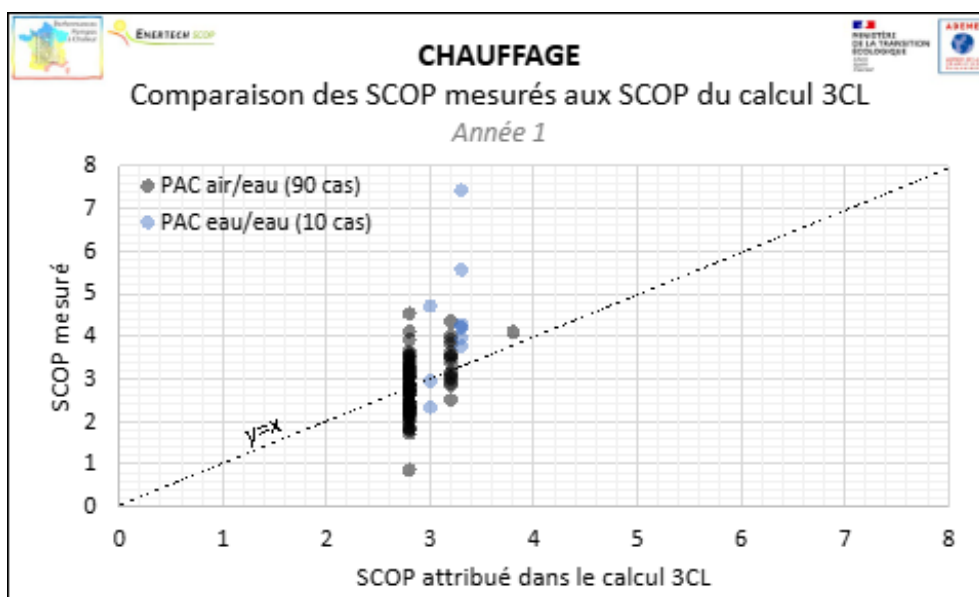


Figure 184 : Comparaison des SCOP mesurés aux SCOP du calcul 3CL, à l'échelle des 100 logements de la campagne

Les valeurs attribuées par défaut sont dans l'ensemble inférieures aux valeurs mesurées. Les PAC eau/eau présentent même des valeurs supérieures à 5 pour des SCOP prévus de 3,2.

Une analyse plus fine des PAC air/eau (Figure 185) montre une bonne cohérence des SCOP sur les installations avec radiateurs et une sous-évaluation des SCOP du DPE sur les installations avec planchers chauffant.

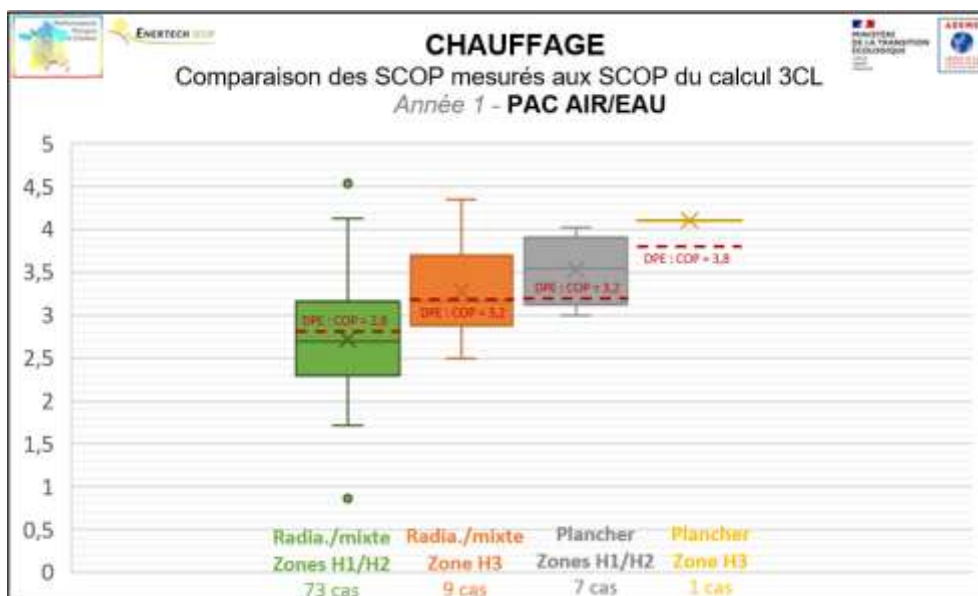


Figure 185 : Comparaison des SCOP mesurés aux SCOP du calcul 3CL pour les PAC air/eau

La même analyse avec les PAC eau/eau, les régions climatiques H1, H2 et H3 et les types d'émetteurs montre une légère sous-estimation pour des installations avec radiateurs et une sous-estimation importante au niveau des planchers chauffant. Le nombre de cas est toutefois insuffisant pour en tirer des conclusions solides.

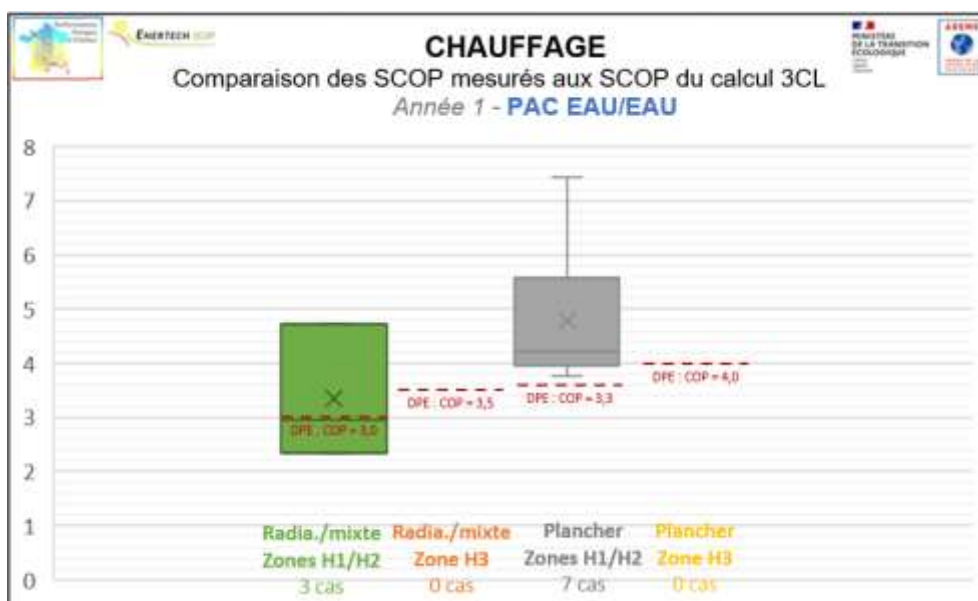


Figure 186 : Comparaison des SCOP mesurés aux SCOP du calcul 3CL pour les PAC eau/eau

1.3.2. Explication des écarts entre SCOP mesuré et SCOP par défaut du DPE

Les valeurs de SCOP « par défaut » du calcul 3CL ne seront pas débattues ici, car décidées par convention (cf. paragraphe précédent). La présente campagne de mesure doit permettre d'en actualiser les valeurs.

Les valeurs de SCOP « ErP » (valeurs certifiées par les fabricants) peuvent être utilisées en substitution des valeurs par défaut lorsqu'elles sont connues. L'objet de la partie suivante est de les comparer à la mesure et d'en expliquer les écarts.

2. Comparaison à la réglementation européenne (ERP)

2.1. Rappel sur l'ERP

Le SCOP ou COP saisonnier déclaré par le fabricant est encadré par la norme européenne EN 14825. Il existe trois classes climatiques en Europe, toutes présentes sur le territoire métropolitain français. La déclaration du SCOP sur la classe climatique A est obligatoire et affichée sur les produits. Les classes W et C sont optionnelles. Les classes climatiques se différencient par la température de base et les nombres d'heures de la saison de chauffe :

- A, Average ou climat moyen, à -10°C avec 4 910 heures ;
- C, Cold ou climat froid à -20°C avec 6 446 heures ;
- W, Warm ou climat chaud à 2°C avec 3 590 heures.



Figure 187 : Zones climatiques de la réglementation européenne (ErP) et de la réglementation thermique française

Visuellement, les régions climatiques réglementaires françaises, de H1a à H3, peuvent être réparties sur les régions climatiques de l'ERP A, W et C :

- C : H1c (1 600m d'altitude) ;
- A : H1a, H1b, H1c, H2b et H2d ;
- W : H1a, H2a, H2b, H2c, H2d et H3.

Par contre, cette correspondance n'est communiquée par aucun organisme compétant.

Le SCOP est calculé à partir de valeurs de COP instantanés et de puissances thermiques à charge partielle mesurés en laboratoire de certification. Les températures extérieures choisies pour les mesures sont : -7°C, +2°C, +7°C et +12°C, plus des températures additionnelles suivant les régions climatiques C, A et W et les capacités des PAC.

températures départ ERP, EN 14825 :

température extérieure						
température extérieure	ERP C	mod Pch	35.0°C	45.0°C	55.0°C	65.0°C
	12.0°C	11.1%	24.0°C	26.0°C	28.0°C	30.0°C
	7.0°C	25.0%	25.0°C	30.0°C	32.0°C	36.0°C
	2.0°C	38.9%	27.0°C	33.0°C	37.0°C	41.0°C
	-7.0°C	63.9%	30.0°C	38.0°C	44.0°C	50.0°C
	-15.0°C	86.1%	32.0°C	41.0°C	49.0°C	57.0°C
	-20.0°C	100.0%	35.0°C	45.0°C	55.0°C	65.0°C
ERP A	mod Pch	35.0°C	45.0°C	55.0°C	65.0°C	
	12.0°C	15.4%	24.0°C	28.0°C	30.0°C	32.0°C
	7.0°C	34.6%	27.0°C	33.0°C	36.0°C	41.0°C
	2.0°C	53.8%	30.0°C	37.0°C	42.0°C	49.0°C
	-7.0°C	88.5%	34.0°C	43.0°C	52.0°C	61.0°C
	-10.0°C	100.0%	35.0°C	45.0°C	55.0°C	65.0°C
	ERP W	mod Pch	35.0°C	45.0°C	55.0°C	65.0°C
12.0°C		28.6%	26.0°C	31.0°C	34.0°C	39.0°C
7.0°C		64.3%	31.0°C	39.0°C	46.0°C	53.0°C
2.0°C		100.0%	35.0°C	45.0°C	55.0°C	65.0°C

Figure 188 : Conditions des mesures des COP instantanés pour l'ERP

Les essais intègrent aussi la température extérieure de limite de fonctionnement TOL et la température de bivalence, c'est-à-dire la température à laquelle la puissance de la PAC n'est plus suffisante pour assurer le confort thermique demandé (nécessité d'un appoint à partir de cette température).

Les résultats des essais de certification sont téléchargeables sur la base de données européenne keymark, rangés par nom de fabricant et de modèle de PAC : <https://keymark.eu/en/products/heatpumps/certified-products>

Dans la plupart des cas, cette base contient des informations de certification uniquement pour la classe climatique A et pour les régimes de température « basse température » (35°C, pour le plancher chauffant) et « moyenne température » (55°C, pour les radiateurs).

Les essais de certification EN 14825 fournissent des informations sur le fonctionnement des PAC à charge partielle : P_{dh}, COP_d et Cd, soit la puissance chauffage à charge partielle, le COP déclaré et le coefficient de perte d'efficacité, qui varie entre 1 et 0,9. Ces valeurs sont ensuite renseignées dans un tableau organisé par température extérieure, de -30°C à +15°C. Les valeurs manquantes non certifiées sont estimées par extrapolation linéaire pour la puissance déclarée et le COP. Ceci peut être considéré comme un des premiers défauts, car l'évolution du COP machine est directement liée au COP Carnot, qui lui est proche d'une évolution parabolique. L'évolution du COP machine serait plus proche de la réalité avec une extrapolation sur l'efficacité du moteur et le calcul du COP Carnot, mais serait légèrement défavorable au SCOP déclaré par le fabricant (différence de 0,1 à 0,2 point sur le SCOP calculé).

Le SCOP_{on}, coefficient de performance saisonnier de la PAC en fonctionnement, est calculé à partir de la formule :

$$SCOP_{on} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j [P_h(T_j)]}{\sum_{j=1}^n h_j \left[\frac{P_h(T_j) - elbu(T_j)}{COP_{bin}(T_j)} + elbu(T_j) \right]}$$

Avec :

- P_h(T_j) : puissance demandée par le bâtiment par intervalle de 1K, sachant que la puissance maximale de référence est la puissance maximale de la PAC à la température de base de la région climatique et la température du départ chauffage celle de l'émetteur, exprimée en kW.
- h_j : nombre d'heures de l'intervalle de température T_j, exprimé en heures.
- elbu(T_j) : puissance requise pour l'appoint électrique pendant l'intervalle de température T_j, exprimé en kW.

- $COP_{bin}(T_j)$: COP corrigé de la PAC pendant l'intervalle de température T_j .

La puissance demandée par le bâtiment est calculée avec la puissance « design » ou « rated » multipliée par le ratio de la charge partielle (mod Pch, voir Figure 188) :

$$pl(T_j) = (T_j - 16) / (T_{designh} - 16)$$

Le ratio $pl(T_j)$ ou mod Pch est calculé par intervalle de température extérieure T_j , $T_{designh}$ étant la température de base. La température de non-chauffe est fixée à 16°C.

Le $COP_{bin}(T_j)$ est calculé avec le COP_d , COP déclaré ou COP mesuré des essais de certification, le facteur CR, facteur de modulation autour de la puissance déclarée ou puissance mesurée lors des essais de certification, et la facteur de dégradation C_d par le cyclage :

$$COP_{bin} = COP_d \times \frac{CR}{C_d \times CR + (1 - C_d)}$$

La valeur C_d est soit déterminée pendant les essais de certification, sinon fixée par défaut à 0,9. La valeur CR, rapport de la puissance du besoin et de la puissance déclarée pour le chauffage, est déterminée par la formule :

$$CR = pl(T_j) \times \frac{P_{designh}}{P_{dh}}$$

Le SCOP est défini comme la demande annuelle de chauffage de référence Q_H divisée par la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage Q_{HE} :

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}}$$

La demande annuelle de chauffage Q_H est calculée avec la puissance P_{design} ou P_{rated} , puissance maximale de la PAC, et le nombre d'heures en mode « actif », H_{HE} :

$$Q_H = P_{designh} \times H_{HE}$$

La consommation d'énergie pour le chauffage Q_{HE} est calculée avec le $SCOP_{on}$ et les énergies des auxillaires et veilles :

$$Q_{HE} = \frac{Q_H}{SCOP_{on}} + H_{TO} \times P_{TO} + H_{SB} \times P_{SB} + H_{CK} \times P_{CK} + H_{OFF} \times P_{OFF}$$

Avec :

- P_{TO} / H_{TO} : Puissance et nombre d'heures en mode arrêt thermostat
- P_{SB} / H_{SB} : Puissance et nombre d'heures en mode veille
- P_{CK} / H_{CK} : Puissance et nombre d'heures en mode chauffage carter du compresseur
- P_{OFF} / H_{OFF} : Puissance et nombre d'heures en mode arrêt

Les nombres d'heures sont figés par convention dans le tableau B2 de la Figure 193.

L'efficacité saisonnière peut ainsi être calculée en prenant en compte le facteur d'énergie primaire, dont la valeur actuelle est de 2,5 (moyenne européenne), et des facteurs réducteurs :

- F1 : 3% pour les pertes d'efficacité liées aux commandes de température
- F2 : 5% pour les pertes d'efficacité liées aux consommations des appareils géothermiques et PAC eau - eau

$$\eta_{s,h} = \frac{1}{CC} \times SCOP - \sum F(i)$$

L'enseignement des équations décrites ci-avant montre une sensibilité probablement forte sur les nombres d'heures de fonctionnement dans les différentes régions climatiques, et pose la question de leur cohérence avec la réalité du terrain. De même, la classe climatique A, obligatoire, ne répond pas correctement à toutes les régions climatiques de France.

	UE : HA 10-5 OS 230V				UI : HA 12-5 STB	
	C	-20.0°C	A	-10.0°C	W	2.0°C
<i>t départ</i>	35.0°C	55.0°C	35.0°C	55.0°C	35.0°C	55.0°C
SCOP	3.87	2.85	4.57	3.27	5.34	4.02
Pch	9.49kW	9.42kW	11.50kW	9.56kW	8.23kW	9.29kW

Figure 189 : Illustration de l'écart de SCOP selon la région climatique de l'ERP

De plus, les facteurs C_d et CR (facteurs de cyclage et de modulation), influençant le rapport entre le COP_d déclaré (essais avec une durée minimale de 30 minutes pour stabiliser le fonctionnement) et le COP_{bin} corrigé dans les essais de certification, représentent probablement de façon infidèle les phénomènes réels constatés par la mesure sur site.

2.2. Comparaison du SCOP ERP et du SCOP mesuré

La comparaison des valeurs certifiées aux valeurs mesurées est un indice important sur le niveau de simplification de la EN 14825 et la diversité des installations de PAC. Le meilleur résultat sera une différence moyenne entre mesure et valeur certifiée proche de 0 avec un écart type faible. Par contre une moyenne supérieure à 10% pour les 100 PAC laisserait présenter la nécessité d'une adaptation de la procédure pour se rapprocher de la réalité. L'analyse du calcul du SCOP par étape peut nous orienter sur les variables qui sont à adapter, dès que l'écart type baisse.

2.2.1. Ecart constatés

Le SCOP mesuré est en moyenne 17,3% inférieur au SCOP ERP de la zone climatique A avec un écart type de 17,7%, comme le montre la Figure 190.

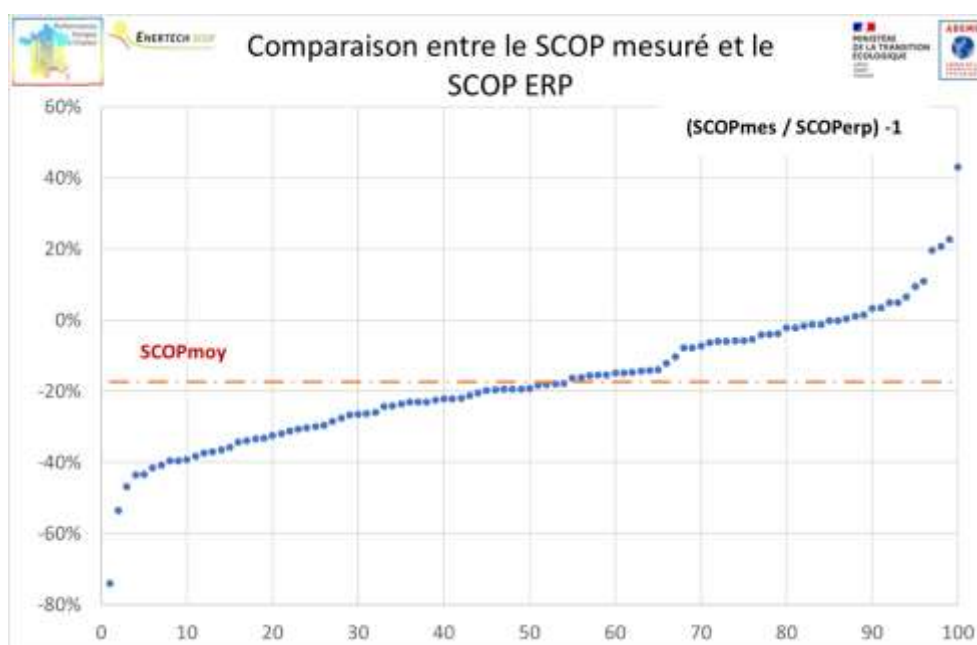


Figure 190 : Comparaison entre SCOP mesuré et le SCOP ERP

Contrairement aux valeurs de SCOP par défaut du DPE, les valeurs certifiées par l'ERP sont sensiblement différentes aux valeurs mesurées :

- La moyenne est plus proche des mesures pour les SCOP par défaut du DPE.
- L'écart – type est plus faible pour les SCOP ERP.

	Différence entre SCOP mesuré et SCOP par défaut DPE	Différence entre SCOP mesuré et SCOP certifié ERP
min	-69,1%	-74,0%
moyenne	2,4%	-17,3%
écart type	25,9%	17,7%
max	125,3%	43,0%

Figure 191 : Comparaison des SCOP mesurés aux SCOP par défaut du DPE et ERP

2.2.2. Facteurs explicatifs

Des pistes explicatives des différences constatées entre les SCOP certifiés et les SCOP mesurés sont identifiables par l'analyse de la construction même du calcul du SCOP suivant la norme EN 14825 :

- **La loi d'eau** : Le calcul du SCOP certifié repose sur des valeurs stationnaires du COP, déterminées en laboratoire à charge partielle aux points de températures extérieures (-7°C, +2°C, +7°C et +12°C), une température de départ chauffage fonction du choix de l'émission (35°C ou 55°C) et la température de base (-20°C pour le climat C, -10°C pour le climat A ou +2°C pour le climat W). La Figure 192 présente les lois d'eau pour une température de départ à 35°C à la température de base. Les loi d'eau ERP tracées sur la figure respectent les conditions imposées par la norme (rappelées dans la Figure 188). La Figure 192 montre bien que les températures de départ dans les conditions d'essai de la norme EN 14825 sont différentes entre les zones climatiques. Le COP à chaque point de température extérieure sera donc différent selon la zone climatique, de même que les SCOP ERP. Une loi d'eau dont la température de base a été recalée à une valeur réelle de -5°C est présentée sur la Figure 192. Elle représente celle du logement 87, équipé d'un plancher chauffant (donc avec 35°C de température maximale d'émission par convention ERP), et un point de non-chauffe de 20°C de départ pour 20°C de température extérieure. Il s'agit d'une configuration fictive où seule la température de base a été recalée, rappelant que les lois d'eau réelles diffèrent de celles proposées par la norme EN 14825. Un focus sur la loi d'eau est proposé dans la suite de cette partie.

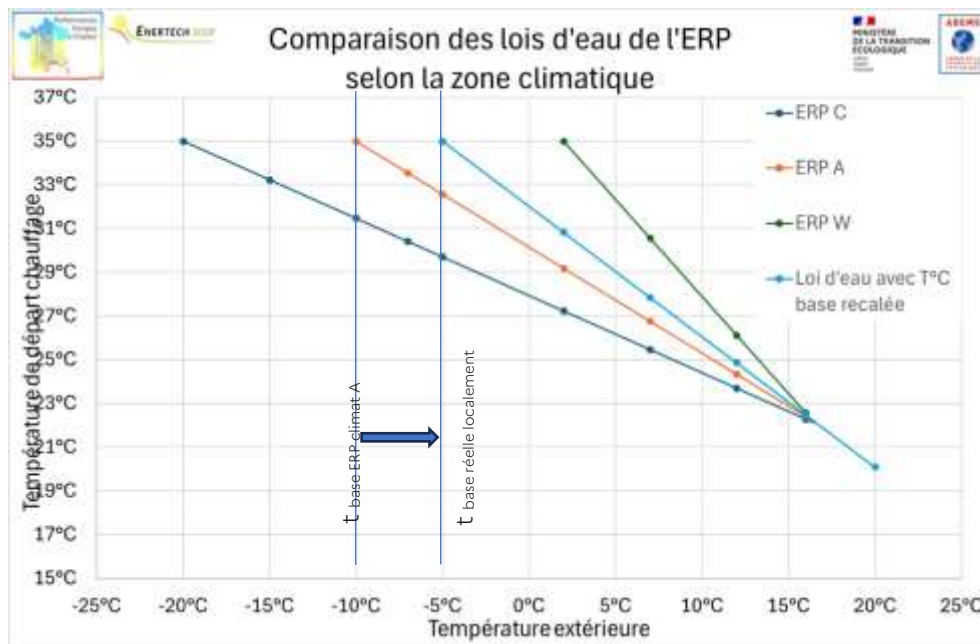


Figure 192 : Comparaison des lois d'eau de l'ERP selon la zone climatique

- La modulation de la puissance :** la puissance maximale renseignée dans la norme de l'ERP est la capacité maximale de la PAC à la température de base. Cependant, le logement à chauffer comporte une puissance de déperdition plus importante (le DTU 65.16 recommande de dimensionner la puissance de la PAC entre 80% et 100% de la déperdition à température de base pour une PAC air/eau). Les deux points définissant la courbe de puissance dépendent de 4 paramètres :
 - La température de base : figée par convention en ERP C à -20°C, ERP A à -10°C et ERP W à +2°C, elle diffère de la température de base réelle sur site.
 - La puissance thermique à la température de base : en ERP, il s'agit de la capacité maximale de la PAC, par exemple au couple de température -20°C / 55°C (cas radiateur en ERP C) ou +2°C / 35°C (cas plancher chauffant en ERP W). Sur site, cette puissance thermique à la température de base est la déperdition du logement et la température de départ dépend des émetteurs.
 - La température extérieure à laquelle la puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le confort est nulle, fixée à 16°C en ERP, est variable entre les logements et dépend en réalité de multiples paramètres, dont les apports gratuits et les déperditions.
 - La puissance thermique à ce point de non-chauffe qui est nulle.
- Les COP stationnaires de la certification ERP sont mesurés par des essais sur 3 à 6 points de température extérieure (-15°C / -10°C / -7°C / 2°C / 7°C et 12°C, nombre de points fonction de la classe climatique et de la capacité de la PAC), avec des températures de départ déterminées par la loi d'eau. Le COP en ERP est ensuite linéarisé par pas de 1°C entre les points de certification, de la température limite de fonctionnement TOL à la température de non-chauffe. Dans la réalité, le COP à une même température extérieure n'est pas constant. Par exemple, la relance le matin ou après un arrêt prolongé demande une température de départ plus élevée, ce qui est défavorable au COP. A température extérieure stable, le maintien des conditions de confort peut se faire ensuite avec des températures de départ plus basses, favorables au COP, un arrêt total de la PAC peut même être observé grâce aux apports gratuits et l'action du thermostat d'ambiance dans la pièce la plus ensoleillée.
- Afin de prendre en compte le fait que dans la réalité la PAC fonctionne parfois à charge partielle (en fonction du besoin du logement), le COP de la certification ERP est pondéré par un facteur de dégradation dû aux cyclages. Nous verrons dans une partie dédiée que la différence entre le COP déclaré et le COP mesuré sur site est le plus important pour des températures extérieures importantes, indiquant possiblement un facteur de dégradation trop faible par rapport à ce qui est observé sur site.

- Le SCOP certifié est ensuite calculé en divisant le besoin thermique total (sommé sur une saison de chauffe dans le climat C, A ou W) et la consommation d'énergie totale (besoin thermique divisé par le COP corrigé du fonctionnement de modulation et de cyclage). Cette somme de consommation d'énergie est la multiplication des puissances horaires et du nombre d'heures d'occurrence de la température extérieure (voir aussi la première formule du SCOP au §2.1). Le nombre d'heures de fonctionnement à chaque température extérieure, ressemblant à une courbe de Gauss, fait varier sensiblement le résultat.

A cette consommation sont ajoutées les puissances de veille de la régulation et des composants assurant le bon fonctionnement du captage de l'énergie. Ces différentes puissances sont multipliées par convention par des heures fixes de fonctionnement. Dans la réalité, ces heures diffèrent selon la PAC, le système de régulation et l'installation. Une saison de chauffe représente en totalité 5544 heures de fonctionnement du 1 octobre au 20 mai. En général, les faibles niveaux de puissance de veille déclarés dans l'ERP n'ont pas une influence importante sur le SCOP global calculé, mais ont un poids important sur les COP instantanés proches des températures de non-chauffe (car la puissance du compresseur y est plus faible).

Pour rappel, les puissances électriques hors production mesurées sont significatives sur une partie de l'échantillon des 100 PAC et pèsent lourd sur le SCOP de certaines installations.

Les tableaux de la Figure 193 sont extraits de la EN 14825 pour les PAC air-eau.

Tableau B.2 – Nombre d'heures utilisé pour le calcul du SCOP

	Chauffage seulement			Réversible		
	« A »	« W »	« C »	« A »	« W »	« C »
	h	h	h	h	h	h
Mode arrêt (H_{arr})	3 672	4 416	2 208	0	0	0
Arrêt par thermostat (H_{ts})	178	754	106	178	754	106
Veille (H_{va})	0	0	0	0	0	0
Heures en mode actif équivalentes pour le chauffage (H_{ac})	2 066	1 336	2 465	2 066	1 336	2 465

Tableau B.3 – Heures en mode dispositif de chauffage de carter pour la détermination du SCOP

	Chauffage seulement			Réversible		
	« A »	« W »	« C »	« A »	« W »	« C »
	h	h	h	h	h	h
Dispositif de chauffage de carter (H_{sc})	3 850	5 170	2 314	178	754	106

Figure 193 : Nombre d'heures utilisées pour le calcul du SCOP

2.2.2.1. Focus sur la loi d'eau

Pour rappel, la loi d'eau est définie par deux couples de température :

- Point maximal : température extérieure de base avec la température de départ nécessaire aux émetteurs pour émettre la puissance souhaitée.
- Point minimal : température extérieure de non-chauffe à laquelle les apports gratuits maintiennent le logement aux conditions de confort souhaitées par l'occupant.

L'ERP nous propose une loi d'eau pour chaque classe climatique, présentées en Figure 192, et définies par les caractéristiques suivantes :

- Température extérieure de base :
 - Classe climat C : -20°C ;
 - Classe climat A : -10°C ;
 - Classe climat W : +2°C.
- Température de départ chauffage à la température de base : 35°C, 45°C, 55°C ou 65°C, identiques pour toutes les classes climatiques.
- Température extérieure de non-chauffe : fixée par convention à 16°C pour les 3 classes climatiques.
- Température de départ à la température extérieure de non-chauffe : aucune précision sur cette valeur, mais une extrapolation des températures de départ en fonctionnement permet de la calculer :

- Classe climatique C : 22,3°C ou 26,1°C pour 35°C ou 65°C de température de départ à température de base ;
- Classe climatique A : 22,4°C ou 27,2°C pour 35°C ou 65°C de température de départ à température de base ;
- Classe climatique W : 22,6°C ou 28,9°C pour 35°C ou 65°C de température de départ à température de base.

Pour illustrer l'écart entre les loi d'eau proposées par l'ERP et la loi d'eau mesurée, nous proposons de prendre l'exemple du logement 87. Il s'agit d'un logement équipé d'un plancher chauffant avec une température de base de -5°C. En considérant comme température de départ à la température de base réelle (-5°C) celle proposée par convention par l'ERP, soit 35°C, cette loi d'eau « ERP locale » est celle présentée précédemment sur la Figure 192. Elle montre que sous ces conditions, cette loi d'eau se situe entre celle proposée par l'ERP pour la zone climatique A et celle de la zone climatique W.

Les mesures montrent que la température de départ moyenne à -5°C n'est pas de 35°C (valeur conventionnelle ERP) mais de 31°C. De plus, la température de non-chauffe mesurée n'est pas de 16°C (ERP) mais plutôt de 24,8°C.

Avec la température de départ et la température extérieure, il est possible d'évaluer le COP instantané d'une PAC en calculant le COP de Carnot et en faisant une hypothèse sur l'efficacité réelle de la machine.

Les lois d'eau présentés sur la Figure 194 montrent qu'à -5°C, les températures de départ mesurées sont plus faibles et donc les COP meilleurs que ceux estimés avec la loi d'eau de l'ERP A. Par contre, à partir de 7°C, c'est l'inverse qui se produit : le COP instantané évalué avec le COP carnot et une hypothèse d'efficacité devient plus faible pour la mesure qu'avec la loi d'eau de l'ERP A.

Cette analyse ne prend pas en compte à ce stade le facteur de dégradation dû aux cyclages pour l'ERP.

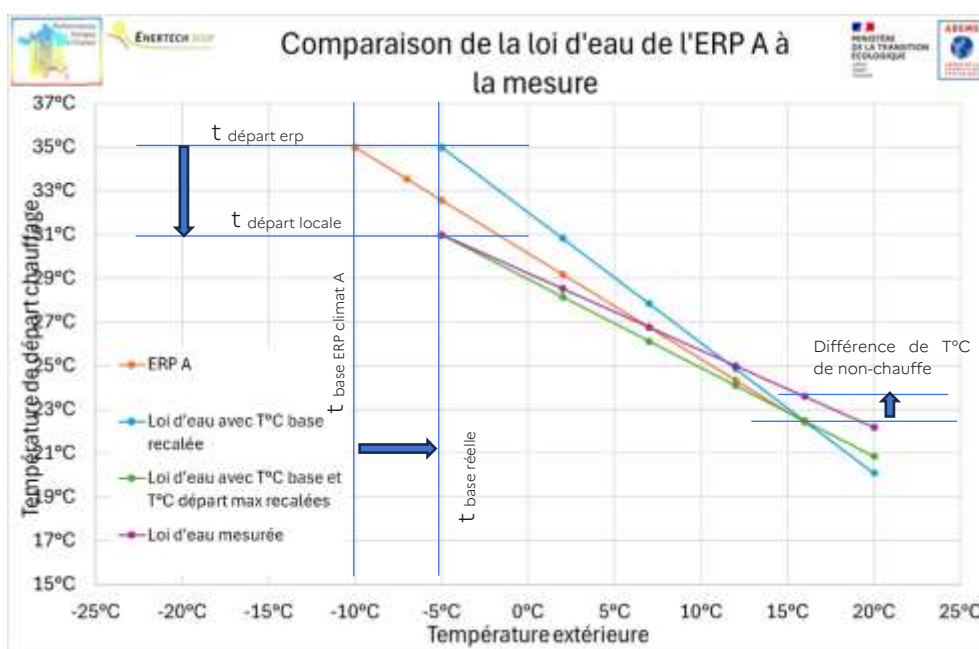


Figure 194 : Comparaison des lois d'eau

2.2.2.2. Focus sur le nombre d'heures de la saison de chauffe et la température extérieure

Pour rappel, le SCOP certifié est calculé en divisant le besoin thermique total et la consommation d'énergie totale. Cette somme de consommation d'énergie est la multiplication des puissances horaires et du nombre d'heures d'occurrence de la température extérieure. Le nombre d'heures de

fonctionnement à chaque température extérieure, ressemblant à une courbe de Gauss, fait varier sensiblement le résultat.

L'occurrence des heures de chauffe a ainsi une influence importante sur le SCOP. La Figure 195 montre la différence du nombre d'heures de chauffe des classes climatiques de l'ERP et des zones climatiques réglementaires françaises.

<i>hi / heures</i> ERP C	<i>hi / heures</i> ERP A	<i>hi / heures</i> ERP W	<i>hi, H1a / heures</i>	<i>hi, H1b / heures</i>	<i>hi, H1c / heures</i>	<i>hi, H2a / heures</i>	<i>hi, H2b / heures</i>	<i>hi, H2c / heures</i>	<i>hi, H2d / heures</i>	<i>hi, H3 / heures</i>
6446h	4910h	3590h	5018h	4960h	4783h	5069h	4759h	4614h	4184h	4085h

Figure 195 : Nombre d'heures de chauffe des classes climatiques de l'ERP et des zones climatiques réglementaires françaises, fichiers RT 2012 du 1er octobre 0h au 20 mai 0h

La Figure 196 montre qu'en zone climatique ERP C, la performance de la PAC sera très bien valorisée dès -5°C jusqu'à +3°C, puis jusqu'à 12°C. Pour l'ERP A, les fortes occurrences se situent entre 0°C et 12°C. Pour l'ERP W, c'est à partir de 7°C jusqu'à 15°C que les occurrences sont les plus importantes. Pour améliorer le SCOP certifié, le COP instantané doit être le plus performant possible aux plus fortes occurrences météorologiques (par exemple dans la zone autour de la courbe de Gauss contenant 50% des degrés-heures, ou entre 10% et 90% des degrés-heures du site). Présenter des COP élevés à la température de base ou proche de la température de non-chauffe aura un impact moindre sur le SCOP certifié comme les nombres d'heures de fonctionnement sont faibles à ces points.

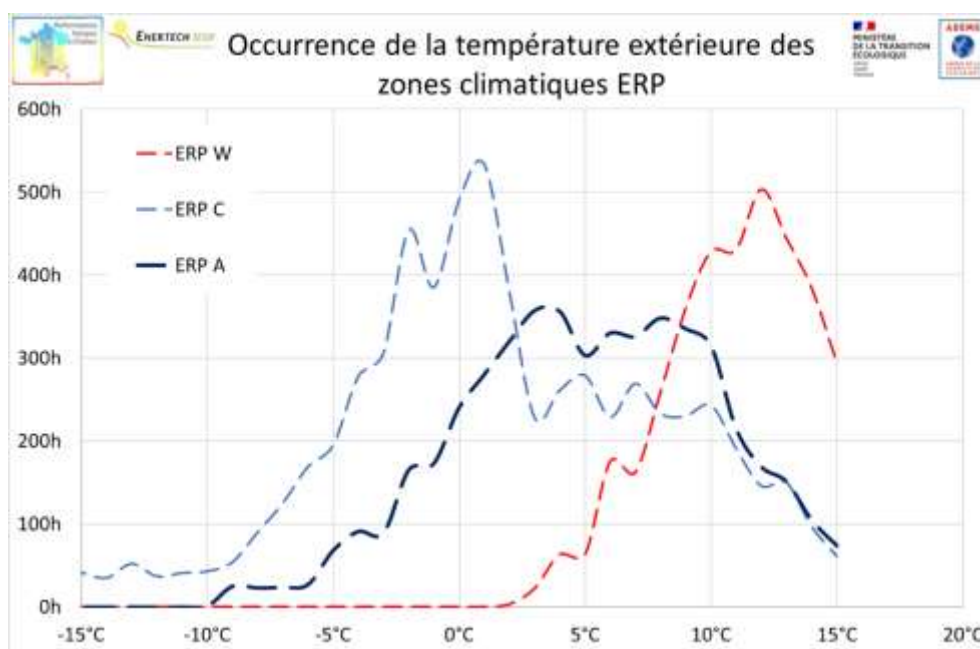


Figure 196 : Occurrence de la température extérieure des zones climatiques ERP

La Figure 197 montre que les régions H1a, H2a, H2b, H2c, H2d et H3 sont proches de la région W pour les températures extérieures supérieures à 10°C, et se situent plutôt entre les classes A et W pour les températures extérieures basses.

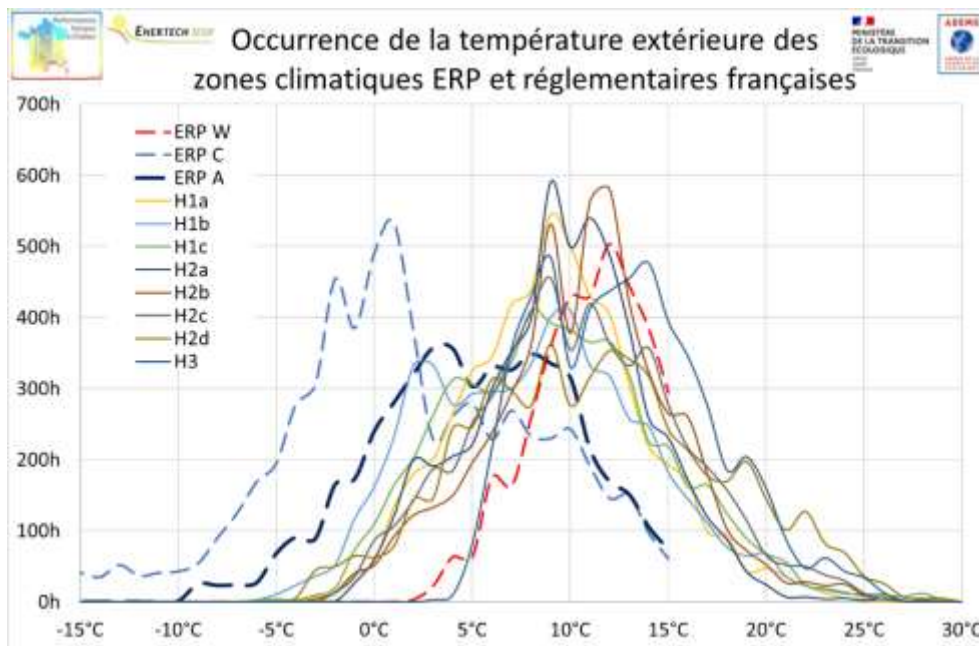


Figure 197 : Comparaison du climat des régions H1a, H2a, H2b, H2c, H2d et H3 (réglementation française) et celui des régions A, C et W (ERP)

Le nombre d'heures de chauffage entre la température de base et la température de non-chauffe de 16°C est assez proche de la classe climatique A pour la plupart des régions climatiques de la réglementation française, mais l'allure globale des courbes ressemblent davantage à celle de la courbe de l'ERP W.

La Figure 197 montre que les régions H1a, H1b, H1c et H2d sont plus proches de la région A au niveau des températures basses et des températures moyennes (excepté la région H1a pour ce second point). La région C est à considérer comme référence en région montagneuse H1c à partir de 1000m d'altitude.

Ce focus alerte ainsi sur le fait que considérer une zone climatique A, au sens de l'ERP, pour l'ensemble des régions françaises est une approximation assez grossière au regard des différentes météo considérées dans la réglementation thermique :

- Le climat ERP A, bien que le plus proche des climats H1 et H2, est toutefois légèrement plus froid.
- Le climat ERP W est plus adapté au climat H3.
- Enfin le climat ERP C devrait être considéré pour des zones en altitude (typiquement > 1000m).

2.2.2.3. Focus sur le facteur de cyclage et de modulation

Sur le marché mondial, la modulation des pompes à chaleur traditionnelles à cycle frigorifique varie entre 25% et 40% de la puissance maximale. En-dessous de cette valeur, le compresseur fonctionne en cycle marche / arrêt, induisant des pertes au démarrage et un vieillissement accéléré dû aux frottements des éléments de compression lors du lancement. Suivant la zone climatique, il est intéressant d'éviter le passage en cyclage de la PAC entre 6 à 12°C de température extérieure, puisque c'est dans cette zone que le nombre d'heures de fonctionnement du générateur est important. C'est pour éviter de cycliser sur ces zones d'intérêt que le bon dimensionnement de la PAC est si important pour sa performance. Une PAC surdimensionnée atteindra plus rapidement sa limite basse de modulation et sera plus exposée au phénomène de cyclage qu'une PAC mieux dimensionnée qui pourra davantage moduler sa puissance sur ces températures entre 6 et 12°C. Pour rappel, le DTU 65.16 recommande de dimensionner la puissance de la PAC entre 80% et 100% de la déperdition à température de base pour une PAC air/eau.

Le facteur de cyclage C_d pris en compte dans l'ERP varie entre 1 et 0,9. Il est pris en compte dans le calcul du COP_{bin} par les formules vues au §2.1 :

$$CR = pl(T_j) \times \frac{P_{designh}}{P_{dth}} \quad COP_{bin} = COP_d \times \frac{CR}{Cd \times CR + (1 - Cd)}$$

Le rapport entre le COP_{bin} et le COP_d (COP déclaré du fabricant du calcul ERP) varie entre -0% à -30% suivant les PAC et les températures.

Les mesures sur deux logements témoins (détaillées dans la suite de la partie) montrent des COP mesurés supérieurs aux COP déclarés à la température de -7°C (cohérent avec la Figure 194 montrant que la loi d'eau du logement 87 est inférieure à celle de l'ERP A en ce point). A +12°C, les exemples développés ci-dessous indiquent que le COP mesuré est inférieur au COP certifié jusqu'à -50% (cohérent avec la Figure 194 montrant que la loi d'eau du logement 87 croise celle de l'ERP A vers les 7°C).

Voici un exemple avec le logement 72 :

- PAC eau/eau 1 étage sur nappe d'eau phréatique de 30m
- Installation de chauffage central : maison individuelle de plain pied de 140m² avec ballon tampon de 200 litres avant plancher chauffant
- Région climatique H2d, t_{base} = -6°C
- SCOP mesuré de 4,21
- SCOP ERP A déclaré de 5,23

Le logement 72 a plutôt un très bon SCOP, même s'il est 20% inférieur à la valeur de référence ERP. La Figure 198 montre que la correction du COP instantané pour prendre en compte les phénomènes de cyclage dans le calcul ERP est faible : -0,86% à 2°C et -5,37% à 12°C. La Figure 198 montre que la correction souhaitable du COP déclaré à partir des mesures devrait être bien plus importante : de -6,8% à -15,6%.

t ext	COPmes/COPd - 1	COPbin/COPd - 1	mod Pch
2°C	-6.8%	-0.86%	83.4%
7°C	-10.4%	-1.90%	56.9%
12°C	-15.6%	-5.37%	30.4%

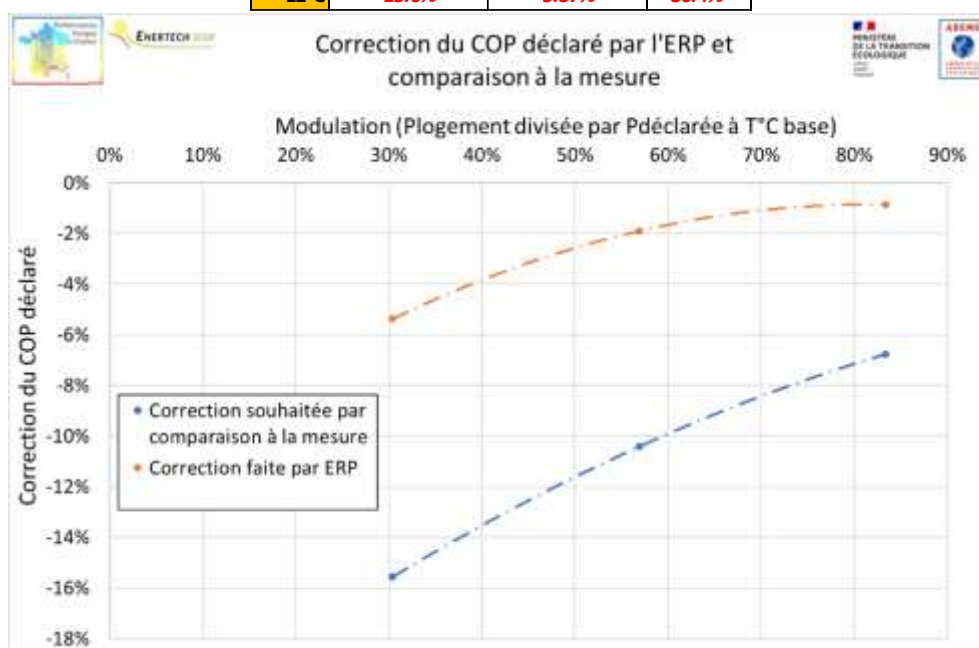


Figure 198 : Correction du COP déclaré ERP pour le logement 72

L'extraction des données de mesure proches (à +/- 0,5°C) des températures de la charge partielle de l'ERP (-7°C, +2°C, +7°C et +12°C) rend visible l'augmentation de la différence entre le COP_d déclaré et le COP_{mes} mesuré. Le COP_d déclaré de la comparaison a été construit avec les données de la certification de l'ERP A pour les températures de départ du site, les COP Carnot et une linéarisation sur les efficacités machine.

ERP A	ratio charge / mod Pch	t départ chauffage ERP	Pch - 35°C	COP _d - 35°C	C _d - 35°C	Pch - 55°C	COP _d - 55°C	C _d - 55°C
-10°C	100.00%	35°C	5,6	4,85	0,99	5,16	2,85	0,99
-7°C	88.46%	34°C	5,61	4,92	0,99	5,06	2,95	0,99
2°C	53.85%	30°C	5,66	5,26	0,99	5,12	3,5	0,99
7°C	34.62%	27°C	5,69	5,54	0,99	5,27	3,91	0,99
12°C	15.38%	24°C	5,72	5,86	0,99	5,37	4,41	0,99

Figure 199 : COP déclaré de la PAC du logement 72

t ext	t départ moy	P _{ch} moy mes	COP _{ch} moy mes	P _{ch} erp est	COP _{ch} erp est
-10°C	39.64°C	8 058W	4.07	5 485W	4.25
-7°C	37.76°C	7 186W	4.24	5 495W	4.39
2°C	32.13°C	4 572W	4.52	5 539W	4.85
7°C	29.01°C	3 119W	4.53	5 589W	5.06
12°C	25.88°C	1 667W	4.45	5 639W	5.27

Figure 200 : COP mesuré de la PAC du logement 72

Dans la configuration de ce logement, un ballon tampon de 200litres est chargé par la PAC mono-puissance proche de 9500W, puis déchargé avec un deuxième circuit vers les surfaces habitables équipées de planchers chauffant. Le résultat au niveau du COP et du cyclage est plutôt bon, compte tenu qu'il s'agit d'une PAC mono-puissance, ce qui est rendu possible grâce au ballon tampon de 200 litres.

La Figure 201 présente les graphiques d'analyse des données par pas de température de charge partielle proches de -7°C, +2°C, +7°C et +12°C.

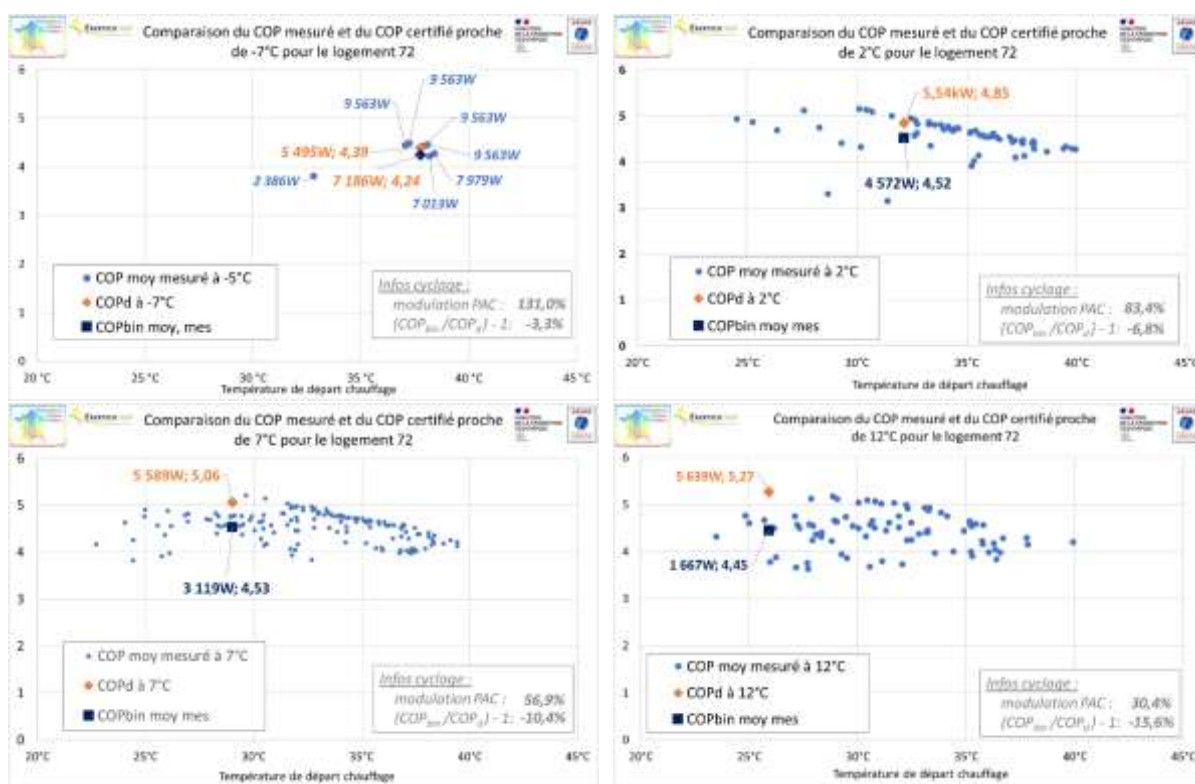
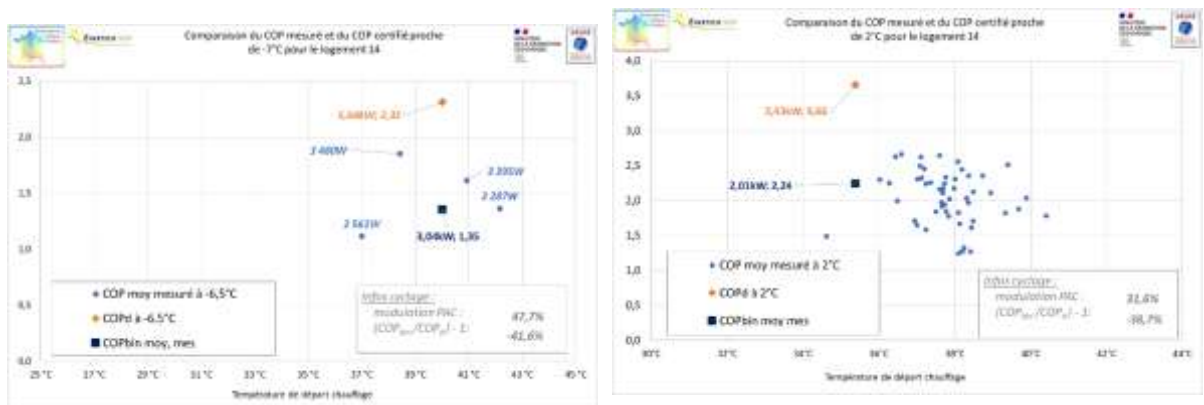


Figure 201 : Données d'analyse du logement 72

- PAC air/eau inverter, haute température
- Installation de chauffage central : maison individuelle R+1 de 123m², plancher chauffant au rdc et radiateur au 1er étage
- Région climatique H1b, $t_{base} = -15^{\circ}\text{C}$
- SCOP mesuré de 2,43
- SCOP ERP A déclaré en 35°C / 4,5 et 55°C / 3,2

t_{ext}	$\frac{COP_{mes}}{COP_d} - 1$	$\frac{COP_{bin}}{COP_d} - 1$	$mod\ Pch$
-10°C	-45.3%	0.0%	53.0%
-7°C	-41.6%	-1.8%	47.7%
2°C	-38.7%	-1.7%	31.6%
7°C	-47.5%	-3.2%	22.6%
12°C	-47.7%	-15.4%	13.7%

La Figure 203 présente les graphiques d'analyse des données par pas de température de charge partielle proches de -7°C , $+2^{\circ}\text{C}$, $+7^{\circ}\text{C}$ et $+12^{\circ}\text{C}$.



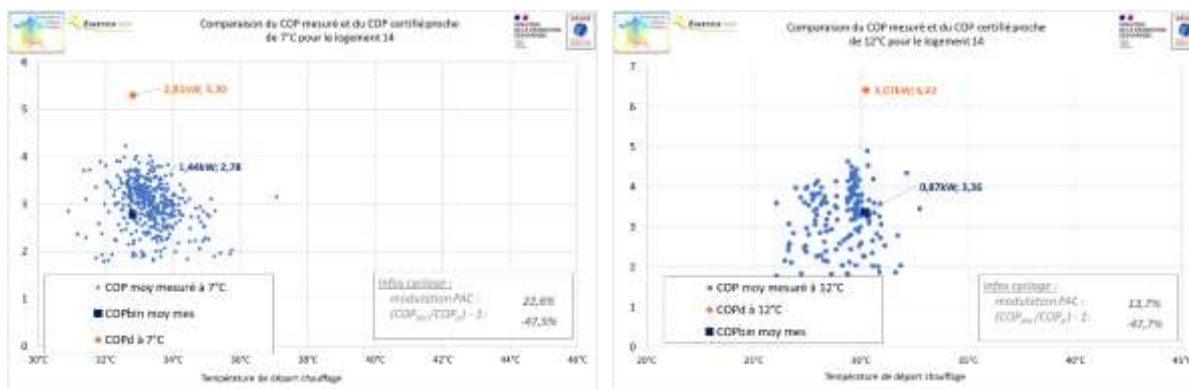


Figure 203 : Données d'analyse du logement 14

Les analyses détaillées ci-dessus pour les logements 72 et 14 ont été réalisées sur d'autres installations. La Figure 204 synthétise les résultats avec 5 logements complémentaires. Le tableau proposé présente :

- La comparaison entre le COP_{bin} et le COP_d . Le COP_d est celui déterminé à partir d'essais en laboratoire en conditions de fonctionnements stables. Afin de prendre en compte que dans la réalité les conditions de fonctionnement sont variables et moins favorables, ce COP_d est « dégradé » avec les facteurs C_d et CR (facteurs de cyclage et de modulation) pour devenir le COP_{bin} . Cette comparaison permet de voir l'influence de la correction de l'ERP avec ces facteurs.
- La comparaison entre le COP_d et le COP mesuré. Elle permet d'apprécier quelle serait la correction « souhaitable » en comparant le COP_d avec les mesures de terrain.
- La modulation « mod Pch » indique à chaque température extérieure le ratio entre la puissance thermique injectée pour le chauffage et la puissance thermique de la PAC à la température extérieure de base, soit la modulation moyenne de la PAC à chacun de ces points.

		température extérieure				
		-10°C	-7°C	2°C	7°C	12°C
logement 14088	$COP_{mes}/COP_d - 1$	-45.3%	-41.6%	-38.7%	-47.5%	-47.7%
	$COP_{bin}/COP_d - 1$	0.00%	-1.75%	-1.75%	-4.61%	-20.90%
	mod Pch	53.05%	47.68%	31.58%	22.64%	13.69%
logement 023062	$COP_{mes}/COP_d - 1$	16.4%	3.1%	-17.9%	-25.0%	-33.4%
	$COP_{bin}/COP_d - 1$	0.00%	-1.61%	-1.50%	-9.70%	-31.22%
	mod Pch	68.98%	63.72%	47.95%	39.19%	30.43%
logement 050040	$COP_{mes}/COP_d - 1$		-28.7%	-30.5%	-41.6%	-56.3%
	$COP_{bin}/COP_d - 1$		-0.67%	-2.11%	-2.13%	-15.08%
	mod Pch		60.44%	42.48%	32.50%	22.52%
logement 070057	$COP_{mes}/COP_d - 1$	-35.9%	-36.0%	-23.8%	-41.5%	-47.6%
	$COP_{bin}/COP_d - 1$	0.00%	0.00%	-0.11%	-1.21%	-2.33%
	mod Pch	52.01%	46.03%	28.10%	18.14%	8.18%
logement 072084	$COP_{mes}/COP_d - 1$		-1.7%	-6.1%	-10.1%	-15.6%
	$COP_{bin}/COP_d - 1$		-0.13%	-0.86%	-1.90%	-5.37%
	mod Pch		131.03%	83.36%	56.87%	30.39%
logement 076050	$COP_{mes}/COP_d - 1$		-47.6%	-10.4%	-4.1%	-9.5%
	$COP_{bin}/COP_d - 1$		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	mod Pch		88.06%	57.85%	41.06%	24.27%
logement 087034	$COP_{mes}/COP_d - 1$		13.6%	-13.3%	-23.6%	-34.1%
	$COP_{bin}/COP_d - 1$		0.00%	-0.21%	-1.27%	-6.26%
	mod Pch		44.80%	32.13%	25.10%	18.06%

Figure 204 : Correction du COP déclaré en ERP sur sept logements

Sur ces logements, nous constatons que la puissance injectée proche de la température de base se situe entre 45% et 92% de la puissance de la PAC, ce qui montre un sur-dimensionnement des PAC d'un facteur 1,1 à 2,2 par rapport aux déperditions. Seule la PAC du logement 72 est bien dimensionnée, puisque sa puissance injectée proche de la température extérieure de base correspond à 76% des déperditions du logement.

Sur cet échantillon, une analyse plus fine montre que la plupart des PAC arrivent à moduler leur puissance au niveau des besoins du logement jusqu'à 2,7 à 7°C. Au-delà, des phénomènes de cyclages sont observés.

La correction du COP_d avec les facteurs de l'ERP est faible proche de la température extérieure de base. A +12°C, cette correction se situe entre 0% et -31%.

La correction souhaitable du COP_d, en s'appuyant sur les données des COP réels mesurés, s'élève à 29% en moyenne. Une part de cette correction est imputable aux loi d'eau qui sont en pratique plus élevées pour les hautes températures que ce qui est estimé par l'ERP, et aussi les facteurs de cyclage et de modulation qui sont optimistes d'après les mesures.

A la température de base, le COP mesuré est supérieur au COP_d pour les logements 23 et 87 car leur loi d'eau réellement mesurée est inférieure à celle prise en compte dans l'ERP.

2.3. Conclusion

Le SCOP ERP (fabricant) est certifié en laboratoire selon la norme EN 14825.

La comparaison aux mesures montre que **les SCOP ERP de la zone A (zone privilégiée par les obligations de certification) sont en moyenne 17,3% supérieurs aux SCOP mesurés.**

L'analyse de la méthode de calcul du SCOP ERP permet d'identifier des explications potentielles aux écarts constatés. Les points saillants sont :

- **L'hypothèse sur la loi d'eau :** Des études sur des cas particuliers montrent des écarts sensibles entre la loi d'eau prise comme hypothèse dans le calcul de l'ERP et les valeurs mesurées. Plusieurs points sont mis en avant :
 - La température de non-chauffe prise en compte par l'ERP est de 16°C, ce qui est très inférieur à ce qui a été mesuré sur la plupart des logements de l'échantillon 100 PAC.
 - La température de départ à la température de base est de 55°C ou de 35°C dans l'ERP selon que l'émetteur soit, respectivement, de type radiateur ou plancher chauffant. En pratique, la température de départ chauffage mesurée à la température de base est potentiellement très différente de ces deux valeurs conventionnelles.
 - La température de base des 3 zones climatiques de l'ERP (-20°C, -10°C et 2°C) sont différentes de celles des logements. Cette remarque est en lien avec le point suivant.
- **Les conditions extérieures :** La rigueur de l'hiver est prise en compte dans le calcul de l'ERP en différenciant 3 climats différents. La France métropolitaine est recouverte par chacun d'eux mais il n'existe aucune source établissant une correspondance claire entre les zones climatiques de l'ERP et les régions climatiques réglementaires françaises. La zone climatique A (moyenne) est privilégiée aujourd'hui puisqu'il s'agit de la seule qui revêt un caractère obligatoire de certification des fabricants. Des différences notables sont observées entre les degrés-heures de cette zone et ceux mesurés sur les 100 installations. En pratique, la zone climatique W (chaude) semblerait plus adaptée pour les régions côtières de l'Atlantique et de la méditerranée, tandis que la zone la plus froide (C) serait plutôt adaptée pour les zones montagneuses.

Un travail de plus grande envergure serait nécessaire sur ce point pour permettre de mieux approcher le climat auquel seront exposées les futures PAC installées sur le territoire.
- **Les facteurs correctifs du COP déterminé en laboratoire :** Les COP sont dans un premier temps déterminés en laboratoire lors d'essais en conditions de fonctionnements stables, ce qui est favorable à leur performance par comparaison à la réalité où les conditions de fonctionnement sont nettement plus instables. C'est pourquoi la norme de l'ERP « dégrade » les résultats avec des facteurs de modulation et un facteur d'intermittence. Ces facteurs semblent aujourd'hui optimistes par rapport à ce que nous avons mesuré dans notre échantillon.

- **La prise en compte des veilles** : Les faibles niveaux de puissance de veille déclarés dans l'ERP n'ont pas une influence importante sur le SCOP global calculé, alors que des puissances électriques hors production significatives ont été mesurées sur une partie de l'échantillon des 100 PAC et pèsent lourd sur le SCOP de certaines installations. Une meilleure prise en compte dans le calcul ERP et un encadrement de ces niveaux de veille (veille des cartes, temporisations des circulateurs) semblent opportuns.

Sur chacun des points, ce projet ouvre des pistes de travail et de réflexion pour que les outils réglementaires prennent en compte plus fidèlement la réalité du fonctionnement des PAC sur le terrain. La campagne de mesures déployée dans le cadre de ce projet constitue une banque de données immense, précieuse et unique, pouvant permettre de fiabiliser les méthodes de calcul théoriques dans le cadre de leur révision ou mise à jour.

3. Autres campagnes de mesures européennes

3.1. Fraunhofer et autres sources allemandes

On trouve en Allemagne différentes campagnes de mesures sur les pompes à chaleur :

- La [source 1]³², *Nicht jede Wärmepumpe trägt zum Klimaschutz bei* (Agenda 21, Gruppe energie Lahr), analyse les mesures sur site de 33 PAC air/eau, eau/eau et géothermiques pendant la saison de chauffe d'octobre 2006 à septembre 2008.
 - o 13 PAC géothermiques, qui présentent dans le cas de planchers chauffants des SCOP de 3,4 ; 4,3 et 4,4
 - o 7 PAC eau/eau sur nappe sans précision sur l'émetteur
 - o 13 PAC air/eau : SCOP de 2,8 sur plancher chauffant en intégrant les pertes du ballon tampon de chauffage et les auxiliaires et 2,2 à 2,4 sur radiateurs.
 - o Le ballon tampon réduit la performance de 0,1 à 0,2 point de SCOP ; manque d'équilibrage hydraulique de l'installation ; manque de maintenance de l'évaporateur pour les PAC air/ eau, du filtre d'eau de nappe et mauvais réglage fréquent de la loi d'eau ; SCOP sur radiateurs 0,1 à 0,4 point plus bas sur PCBT.
- La [source 2]³³, *Wärmepumpen Effizienz, Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb* (Fraunhofer Institut, mai 2011) analyse les mesures sur site de 110 pompes à chaleur (18 pompes à chaleur air/eau, 3 PAC sur nappe et 56 PAC géothermiques) d'octobre 2005 à septembre 2010 en Allemagne.
 - o Projet financé en majorité par ministère de l'industrie et les fabricants de PAC allemands
 - o Objectif d'analyser l'efficacité des PAC dans des bâtiments neufs de différents niveaux de performance thermique
 - o SCOP moyen mesurés : 3,7 pour les PAC sur nappe (T°C source 10,8°C) ; 3,9 à 4,1 pour les PAC géothermiques (T°C source 3,7°C) ; 2,9 à 3 pour les PAC air/eau (T°C source 2,8°C)
- La [source 3]³⁴, *Bewertung der Effizienz von Wärmepumpen basierend auf Untersuchungen im realen Betrieb* (Fraunhofer Institut), analyse les mesures sur site de pompes à chaleur air/eau, eau/eau et géothermiques d'octobre 2005 à septembre 2010 en Allemagne.

³²https://www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche_1/stab_1/innovationsfonds/abschlussberichte/2006_6/2006-08_Abschlussbericht_Waermepumpe.pdf

³³ <https://edocs.tib.eu/files/e01fb11/665477864.pdf>

³⁴ <https://ake-metzingen.info/wp-content/uploads/2016/06/20160531-WP-Miara.pdf>

- Enfin la [source 4]³⁵, *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden, Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt WPsmart im Bestand* (Fraunhofer Institut) analyse les performances de 13 PAC géothermiques, 2 PAC eau/eau sur stockage de glace et 32 PAC air/eau de 2014 à fin 2019 en Allemagne.

Cette analyse porte essentiellement sur la campagne de mesure *Wpsmart im Bestand* [source 4]³⁵ du Fraunhofer Institut. Les références aux autres études seront signalées au fil du texte le cas échéant.

Cette campagne de mesure du projet ponctue une série de projets antérieurs, non mentionnés dans les sources précédentes. En effet depuis 2005 des mesures in-situ ont été réalisées par le laboratoire ISE du Fraunhofer à Freiburg en Allemagne (Figure 205) :

- Le projet **WP-Effizienz** a démarré en 2005 et s'est achevé avec environ 100 PAC en 2010 instrumentées dans des bâtiments neufs.
- Le projet **WP im Bestand** a démarré en 2006 s'est achevé en 2009 avec plus que 80 PAC instrumentées dans du bâtiment ancien.
- Le projet **WP Monitor** a démarré en 2009 et s'est achevé en 2013 avec environ 80 PAC instrumentées pour permettre l'analyse des régulations et identifier des possibilités d'amélioration.
- Enfin le projet **WPsmart im Bestand** s'est déroulé de 2015 à 2019 avec l'étude de 100 pompes à chaleur.

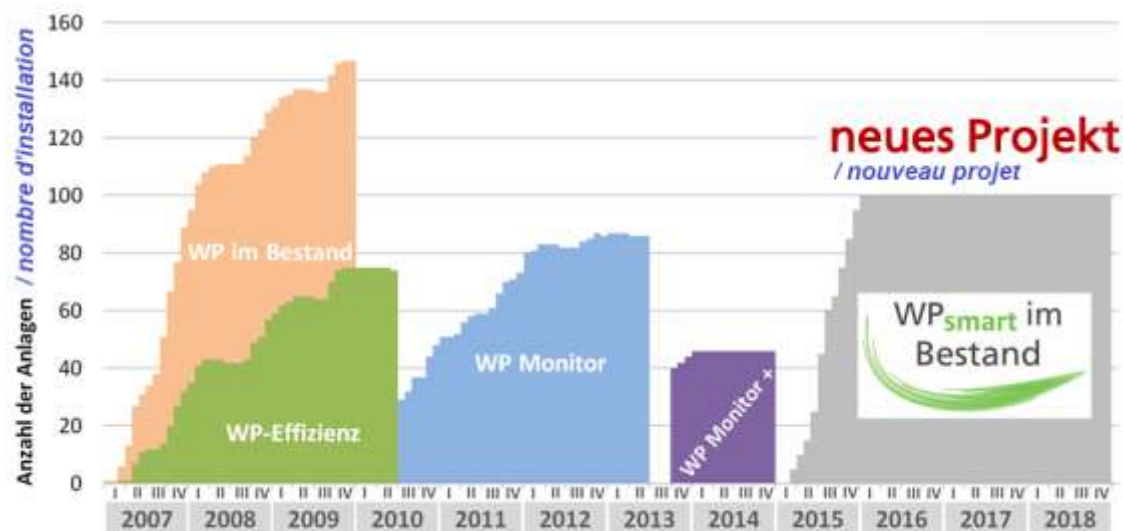


Figure 205 : Projets de recherche d'évaluation des installations de pompes à chaleur réalisés par le laboratoire du Fraunhofer Institut, ISE, à Freiburg en Allemagne

En 2011 Marek Miara, du Fraunhofer Institut, a communiqué les premiers enseignements sur les SCOP mesurés lors des deux premiers projets (Figure 206). La différence entre les moyennes observées est alors surtout expliquée par des proportions différentes d'émetteurs haute et moyenne température. En effet l'étude sur le bâti ancien comportait 54 installations sur radiateurs, 19 mixtes et 2 sur PCBT tandis que l'étude sur les bâtiments neufs comportait 1 installation sur radiateurs, 2 mixtes et 72 sur PCBT.

35 https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-Q3ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf

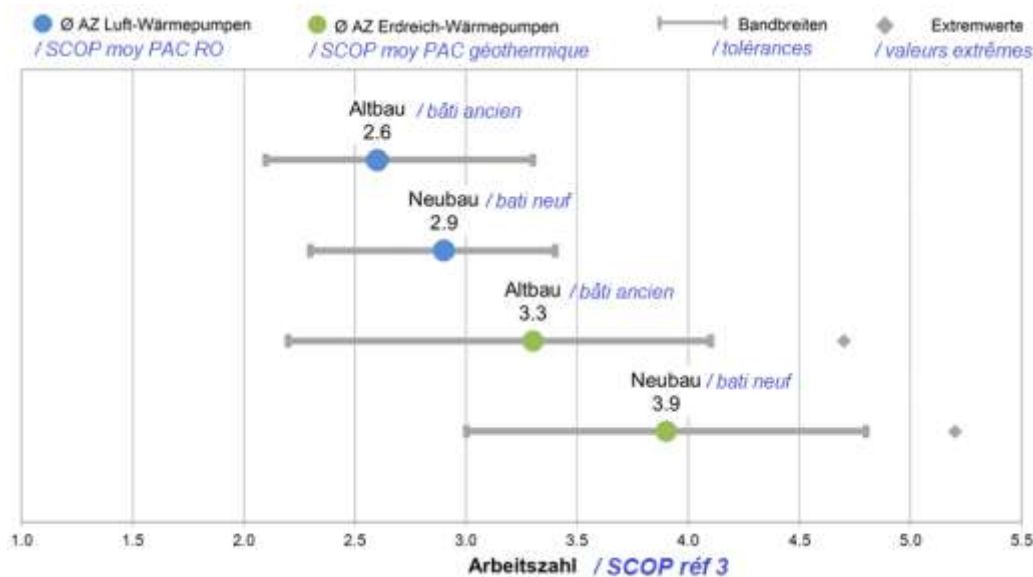


Figure 206 : Communiqué de 2011, Marek Miara, Fraunhofer Institut, sur les performances des PAC sur le terrain

Des analyses plus détaillées ont pu être réalisées par la suite sur le lien entre les âges/isolations des bâtiments et les valeurs de SCOP associées [source 4]³⁵, mais sans trouver de corrélation très explicite.

Des communications diverses ont démontré l'évolution au fil du temps des performances des pompes à chaleur en Allemagne. A partir des premières installations des années 70 à 80 et après les chocs pétroliers de 1973 et 1979, la formation des installateurs s'est peu à peu améliorée. Par ailleurs beaucoup d'enseignements de terrain et d'innovations ont permis d'améliorer la technologie du circuit frigorifique pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire :

- Développement des compresseurs SCROLL pour le chauffage ;
- Développement d'évaporateurs, ventilateurs, circulateurs plus performants ;
- Fonctionnement avec loi d'eau sur sonde extérieure et correction sur sonde d'ambiance ;
- Etc.

Ces éléments permettent d'afficher des améliorations progressives du SPF (Seasonal Performance Factor) (Figure 207).

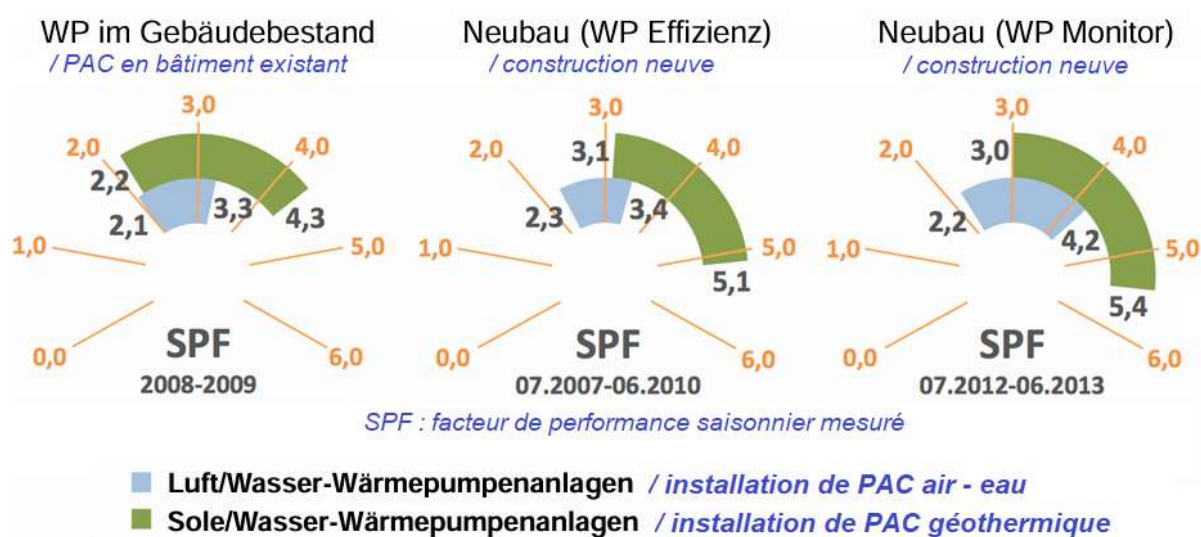


Figure 207 : Communication du Fraunhofer sur l'évolution des SCOP (SPF) mesurés au fil du temps.

La pompe à chaleur n'a longtemps été prévue que dans le cadre d'installations neuves, puis le développement des radiateurs « basse température » et des ventilo-convecteurs ont permis d'ouvrir le marché de l'installation en rénovation dans les bâtiments existants (« Bestand »). Cependant une performance annuelle correcte ne sera obtenue que si le rendement du système de génération est performant a minima dans la plage de température extérieure de 0°C à 10°C, très fréquemment rencontrée au cours de l'hiver (Figure 208). L'inefficacité ou impossibilité de production des PAC à des températures très froides peut être résolue par le maintien, en rénovation, de l'ancien générateur.

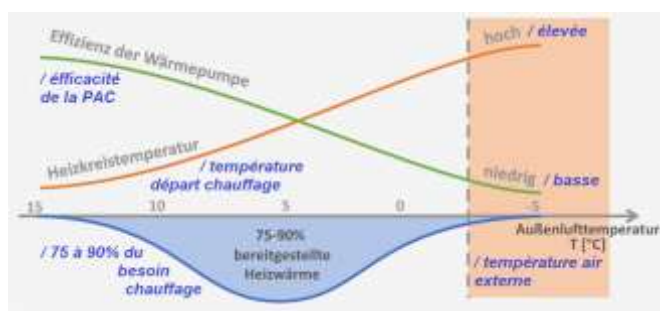


Figure 208 : Evolution des performances d'une PAC et combinaison possible avec des énergies d'appoints.

Un autre volet important dans les études du Fraunhofer est l'analyse écologique et économique. En effet l'électricité allemande est plus carbonée³⁶ et plus chère qu'en France. Ce contexte a notamment favorisé l'émergence des PAC hybrides au gaz dès 2005.

3.1.1. Les logements et les installations

La campagne de mesure qui nous intéresse ici (source 4⁽⁵⁾) porte sur **41 PAC en maison individuelle** (surface moyenne 172 m²) et **13 PAC en petit collectif** (2 à 4 familles ; surface moyenne 183 m²). Les années de construction des logements sont les suivantes :

- 57% avant 1979
- 32% entre 1980 et 1996
- 11% entre 1997 et 2005

³⁶ En 2017 = : 514g CO₂éq/kWhél. En 2020 : 380g CO₂éq/kWhél. En 2024 : 334g CO₂éq/kWhél (https://app.electricitymaps.com/map/all/yearly).

Le besoin de chauffage théorique (calcul réglementaire) des logements varie de 50 kWh/m²/an à 250 kWh/m²/an avec une moyenne calculée à 110 kWh/m²/an. Aucun lien entre l'âge de construction et le besoin de chauffage n'a pu être dressé, du fait d'historiques de rénovations disparates.

Parmi les 41 PAC air/eau, on trouve 31 PAC double service (dont 2 cas spécifiques³⁷) et 10 PAC simple service. Les 13 PAC eau/eau sont sur sonde verticale et deux d'entre elles disposent d'un stockage de glace.

Dix installations comportent une chaudière d'appoint : 7 chaudières fioul, 2 chaudières au gaz naturel et 1 chaudière au propane. Ces appoints sont présents pour différentes raisons :

- PAC en limite de capacité lors des températures les plus froides ;
- Rénovation du bâtiment par étapes et maintien des générateurs anciens en secours ;
- Réduction des coûts de consommation (utilisation d'abonnements spécifiques).

La combinaison des rendements des PAC (SCOP de 2,5 à 4 sans les circulateurs) et des rendements des chaudières (70% en gaz et 92% en fuel à condensation selon [source 4]^{ajustement de slcioi}), avec les tarifs des différentes énergies, est économiquement intéressante et réduit la puissance de PAC installée donc le coût d'investissement dans un petit logement collectif pour 2 à 3 familles. Avec le dispositif « SMART », les tarifs d'effacement permettaient initialement au fournisseur d'électricité d'arrêter la PAC trois fois par jour pendant 2 heures. Aujourd'hui le fournisseur peut même moduler la puissance de la PAC en fonction des tensions sur le réseau électrique, sans nécessairement *arrêter* les installations. De plus des tarifs électriques « dynamiques » sont proposés, non seulement pour réduire la consommation pendant les heures critiques, mais aussi pour stocker l'énergie dans les ballons tampons durant les prix plus bas du « Spot ».

Les ballons tampons de chauffage, dont 30 PAC sont équipées dans le projet, ont un volume moyen de 248 litres et permettent de lisser les appels de puissance et de bénéficier en partie des avantages du tarif bas du « Spot ». Ils permettent également de lisser la production de chaleur des PAC mono-étagées (configuration fréquente en PAC géothermique) ce qui limite les court-cycles en mi-saison. Leur pertes thermiques sont estimées à 2,66 kWh/m²/an, ce qui constitue tout de même 4,1% du besoin de chaleur moyen par logement de 11 900 kWh/an. La campagne [source 2]³³ fait une analyse spécifique des PAC géothermiques durant l'hiver 2009/2010. Une baisse significative du SCOP est observée avec des ballons tampon multi-énergies (ballon tampon chauffage + ECS + raccordement à d'autres sources d'énergie), principalement du fait de problèmes de régulations dans la gestion de la charge des ballons.

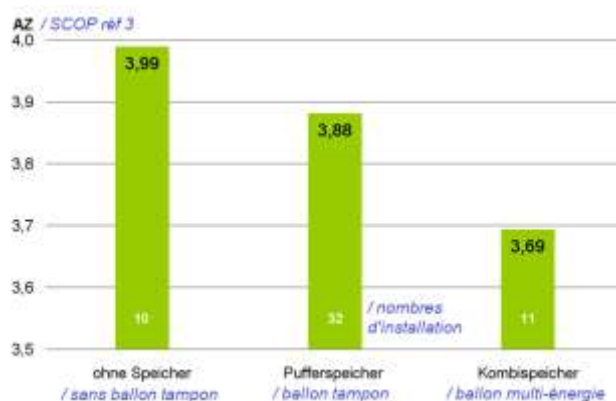


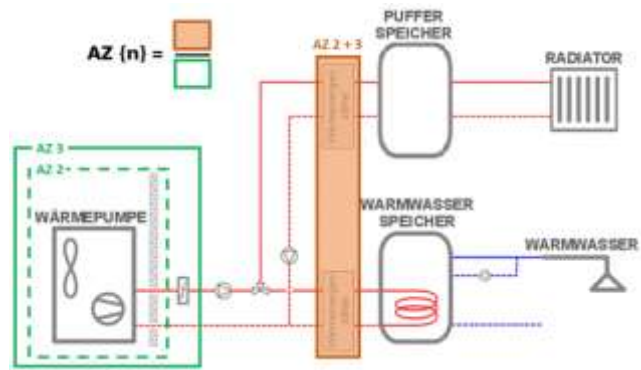
Figure 209 : SCOP / AZ en fonction du ballon tampon de chauffage

³⁷ Deux cas spécifiques air/eau : ECS et chauffage solaires pour un cas ; gestion smart (pilotage réseau) pour l'autre.

3.1.2. Les performances mesurées

Le SCOP est évalué avec appoint électrique (AZ 3) ou sans appoint électrique (AZ 2) (Figure 210). Les circulateurs de chauffage / charge du ballon d'ECS, la vanne trois voies chauffage, ne sont pas pris en compte. Le SCOP (seasonal coefficient of performance) se nomme en Allemand JAZ (pour « Jahresarbeitszahl », « coefficient de travail annuel »). Pour les PAC double-service, le JAZ est calculé sur la chaleur globale chauffage + ECS.

Dans la campagne [source 2]³³, une analyse spécifique est menée sur les différentes températures de source froide : air, eau ou sol. Des valeurs proches sont observées sur les températures de l'air et celle des capteurs géothermiques horizontaux (Figure 211). Ce point est également observé dans le projet 100 PAC, même si les températures sont plus élevées (Partie 2 §2.1.3.3).



AZ : Arbeitszahl / COP	Warmwasserspeicher : Ballon ECS
Radiator : radiateur	Warmwasser : eau chaude sanitaire (ECS)
Wärmepumpe : PAC, ici PAC air/eau	Pufferspeicher : ballon tampon CH

Figure 210 : Définition du COP (AZ)

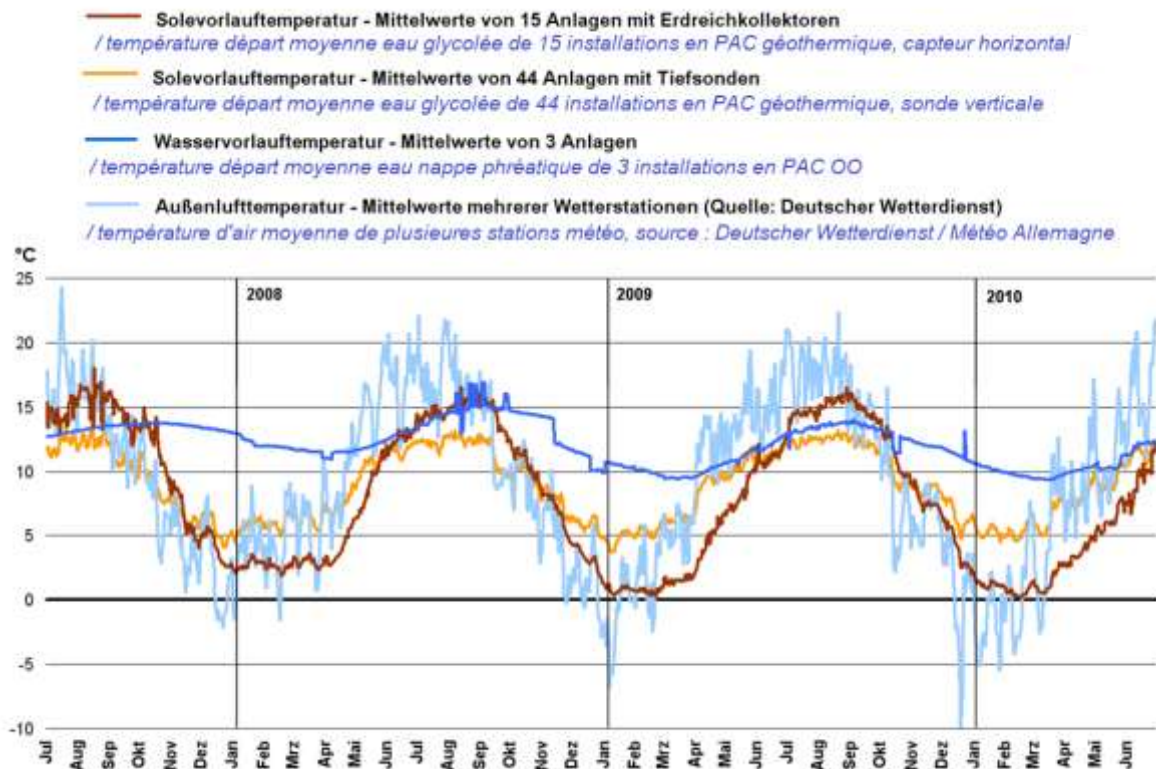


Figure 211 : Evolution annuelle de différentes températures de sources de captation de PAC en Allemagne

Les PAC air/ eau :

Les SCOP ci-contre (Figure 212) concernent les valeurs moyenne de 29 PAC air-eau double service durant la période de juillet 2018 à juin 2019.

La part de consommation moyenne dédiée à l'ECS est de 15% (min 4% ; max 42%) ce qui est très proche des observations faites sur 100 PAC. Les températures moyenne de charge ECS sont de 50°C (aller) et 44,2°C (retour) ce qui est là encore assez similaire à ce qui est mesuré sur 100 PAC (départ moyen charge ECS 49,6°C, retour moyen 45,4°C)³⁸.

Le dT moyen de production de chauffage est de 5,5°C (min 3°C ; max 7,8°C - valeurs lues dans le rapport) ce qui signifie un régime moyen de production chauffage de 39,3°C au départ et 33,8°C eu retour. Ces valeurs sont extrêmement proches de valeurs mesurées sur 100 PAC, avec un même taux d'émetteurs « plancher pur » (15-17% dans les deux cas) : départ chauffage moyen 100 PAC 38,3°C et retour 34,9°C.

Pourtant la température moyenne hivernale des 29 sites est de 4,8°C (min 2,2°C ; max 7,1°C), ce qui est assez nettement plus froid que l'échantillon 100 PAC (moyenne 7,4 °C, min 4°C ; max 11,7°C). On en déduit donc que les lois d'eau sont mieux réglées en Allemagne et/ou les émetteurs plus généreusement dimensionnés (si l'on exclut l'influence d'éventuels générateurs de secours lors des vagues de froid). Ceci confirme l'optimisation possible identifiées sur les réglages des lois d'eau des installations 100 PAC.

Concernant les SCOP, l'étude du Fraunhofer fournit un SCOP moyen « chauffage + ECS » de 3,16 (min 2,5 ; max 4,6) en moyenne sur ses 29 installations. La valeur « à périmètre équivalent »³⁹ des 55 PAC de l'échantillon 100 PAC est de 3,02 (min 1,1 ; max 4,2). Compte tenu des valeurs de températures évoquées plus haut, on estime que l'efficacité de Carnot moyenne est 15% meilleure sur la campagne du Fraunhofer que sur la campagne 100 PAC.

Les résultats sont donc meilleurs en Allemagne, d'autant plus si on intègre la différence de température hivernale (qui correspond à l'écart d'environ « 1,5 » zone climatique française). Si on extrapole³⁹ les résultats de 100 PAC au climat allemand on obtient 2,39 au lieu de 3,16, ce qui porte donc à + 30% le résultat de SCOP allemand par rapport à ce qui aurait été mesuré sur les 55 PAC air/eau double-service de l'échantillon 100 PAC dans les mêmes conditions climatiques.

Quelques pistes d'explications possibles :

- L'utilisation de générateurs de secours aux températures les plus froides ?
- Des COP ECS meilleurs (les résultats 100 PAC étant assez moyens sur cet usage) ;

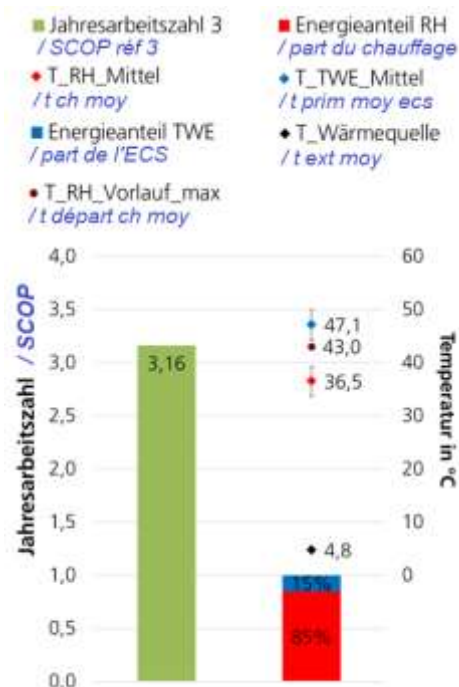


Figure 212 : SCOP moyen en PAC air/eau sans les circulateurs.

38 NB : ces températures sont des températures moyennes de fonctionnement couvrant l'ensemble du cycle de charge ECS (si le ballon est déchargé, le début du cycle est « froid »), ne pas les interpréter comme la température maximale en fin de charge qui est reliée, au pincement près, à la consigne d'ECS.

39 Valeur prise sur les 55 PAC air/eau double service, en SCOP global « chauffage + ECS » (2,77), rapporté en SPF3 à 3,02 (règle de 3 sur Figure 102 : $\times 3,11/2,85$), et dégradé de 7,4°C – 4,8°C = 2,6°C de température extérieure sur la régression linéaire du SCOP air/eau en fonction de la température moyenne de la zone climatique dans l'étude 100 PAC (H1 : 6,5°C – SCOP 2,6 / H2 : 8°C – SCOP 3,0 / H3 9,8°C – SCOP 3,4°C), ce qui donne une dégradation de 0,63 points de SCOP. Résultat final : $3,02 - 0,63 = 2,39$. Or les mesures du Fraunhofer donnent 3,16 (+32%).

- Plus d'heures de fonctionnement (hivers plus longs et rigoureux) ce qui allonge mécaniquement les cycles et donc améliore l'efficacité moyenne des compresseurs ;
- Moins de phénomènes de cyclages liés à des défaut de régulation et paramétrage ;
- Des puissances de veilles mieux maîtrisées (voir plus loin).

Les PAC géothermiques :

Les SCOP des 12 PAC géothermiques sur sonde verticale, sur la période juillet 2018 / juin 2019, sont présentés en (Figure 213). La part de chauffage est en moyenne de 85% comme pour les PAC air/eau. Les températures de charge du ballon sont également similaires.

La température moyenne annuelle du sol des 12 sites n'est que de 4,7°C (min 3,3°C ; max 9,4°C) ! Cette valeur est très en deçà de la température moyenne des sources « géothermiques au sens large » mesurée sur 100 PAC (moyenne 10,8 °C en production chauffage sur les 10 cas instrumentés).

Les SCOP moyen « chauffage + ECS » s'établit à 3,88 (min 1,8 ; max 4,7).

La part maximale de l'appoint électrique a été observée sur l'installation ID 324 avec 3,9% de la consommation électrique du compresseur.

Contrairement aux PAC air/eau, ces résultats de SCOP sont plutôt inférieurs à ceux mesurés sur 100 PAC sur les PAC eau/eau, où les SCOP « à périmètre équivalent »⁴⁰ sont :

- 4,38 (min 2,63 ; max 5,53) pour les 6 PAC eau/eau double-service
- 3,93 (min 2,56 ; max 4,64) pour les 4 PAC eau/eau simple-service

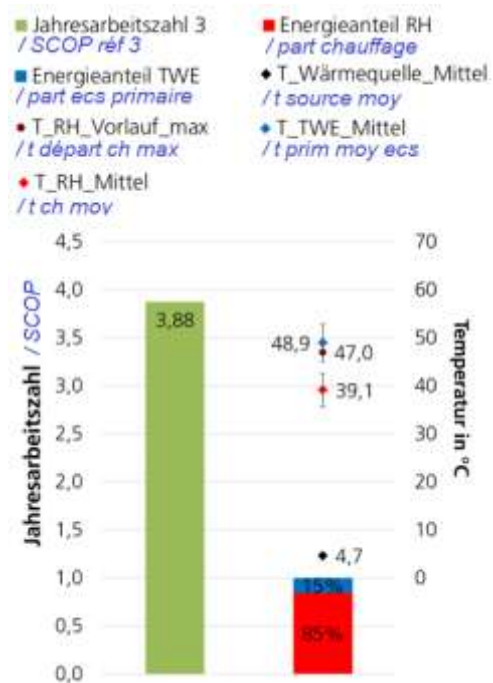


Figure 213 : SCOP moyen en PAC géothermique

Il est impossible de situer précisément les raisons de ces écarts, d'autant que les échantillons sont faibles et les types de captages assez disparates. On peut néanmoins avancer que la température de la source froide, plus favorable en France, y contribue certainement. La plus grande quantité d'émetteurs de type plancher chauffant dans 100 PAC (7 cas sur les 10 PAC eau/eau ; contre seulement 3 cas sur les 12 PAC géothermiques de la campagne du Fraunhofer, cf. Figure 217), joue également dans ce sens.

Les PAC eau/eau sur source « stockage de glace »

Les SCOP moyens des 2 PAC eau-eau sur stockage de glace durant la saison de chauffe 2018/2019 sont de 3,6 et 3,7. La part d'énergie primaire dédiée à la production ECS est de 14% dans un cas et 16% dans l'autre. Les températures primaires de charge ECS sont de 44,3°C et 52,2°C.

Les températures maximales de départ chauffage sont assez basses également :

- 44,5°C pour -3,6°C extérieur (émetteurs : PCBT + radiateurs)
- 42,4°C pour -2°C extérieur (émetteurs : radiateurs seuls)

⁴⁰ Valeur prise sur les 6 PAC eau/eau double service, en COP global « chauffage + ECS » et sur les 4 PAC eau/eau simple service avec une majoration de 10% pour le retrait des consommations de circulateurs (SPF3).

Les deux systèmes disposent d'un appoint de chauffage important, l'un via une chaudière fuel et l'autre avec via un poêle à bois et une résistance électrique. La résistance électrique ne représente que 4,5% de la consommation du compresseur et les deux tiers de son utilisation sont dédiés au chauffage.

La consommation des veilles et des auxiliaires :

La [source 2]³³ de l'ISE présente la consommation de la régulation de 15 pompes à chaleur géothermiques et 8 pompes à chaleur air/eau de juillet 2009 à juin 2010. Les puissances appelées et l'énergie consommée par la régulation s'établissent à :

- PAC géothermique : 4W à 21,5W, soit 102 kWh/an
- PAC air/ eau : 4,7W à 20,2W, soit 93 kWh/an

Ces valeurs sont clairement inférieures à celles mesurées sur 100 PAC. Pourtant une possibilité de réduction de 40 kWh est estimée dans l'étude pour les PAC simple-service qui peuvent être coupées en été. Trois PAC sont toutefois mentionnées avec des consommations de veille plus importantes : une puissance maximale absorbée de 58,2W et une consommation annuelle de 510kWh/an ! Ce type de cas est plus fréquemment rencontré dans l'échantillon 100 PAC.

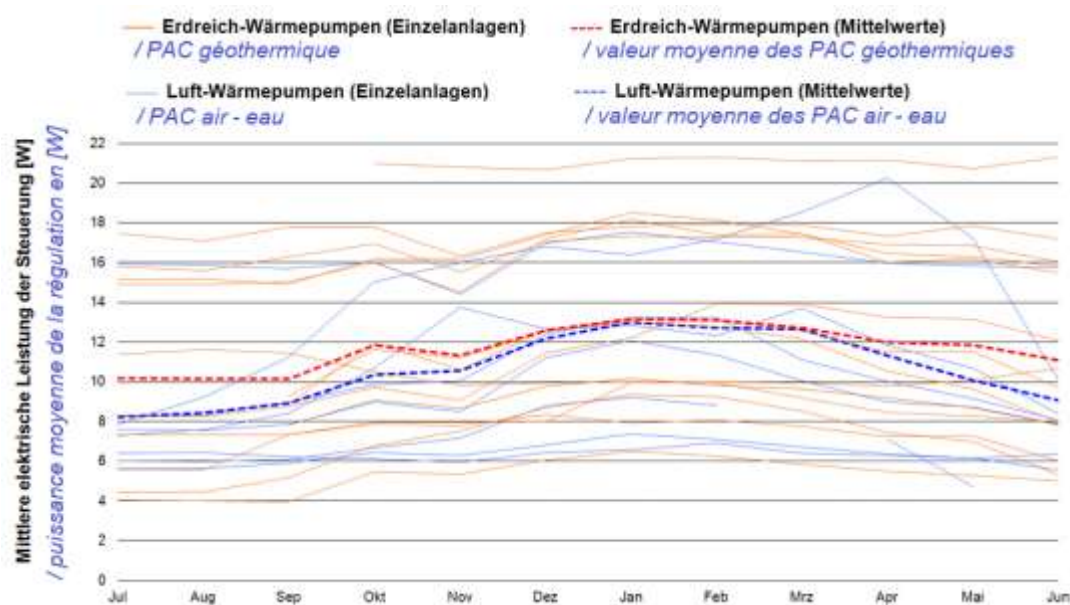


Figure 214 : Suivi des consommations des veilles pendant le projet WP Smart

L'influence des auxiliaires sur le SCOP (ou SPF, ou AZ) est présentée en Figure 215, graphique extrait de la [source 2]³³. La variabilité interannuelle est principalement liée aux variations climatiques. La moyenne « Gesamt » à l'extrémité du graphique montre l'abaissement progressif du SCOP avec la prise en compte des auxiliaires : - 0,26 point avec l'intégration du circulateur « source » en eau glycolée et -0,13 point avec l'intégration du circulateur de chauffage (contre -0,28 dans la campagne 100 PAC, cf. partie 2 §2.1.3.7, ce qui confirme les problèmes évoqués dans cette campagne (sur-débits, nombre de pompes, temporisations)).

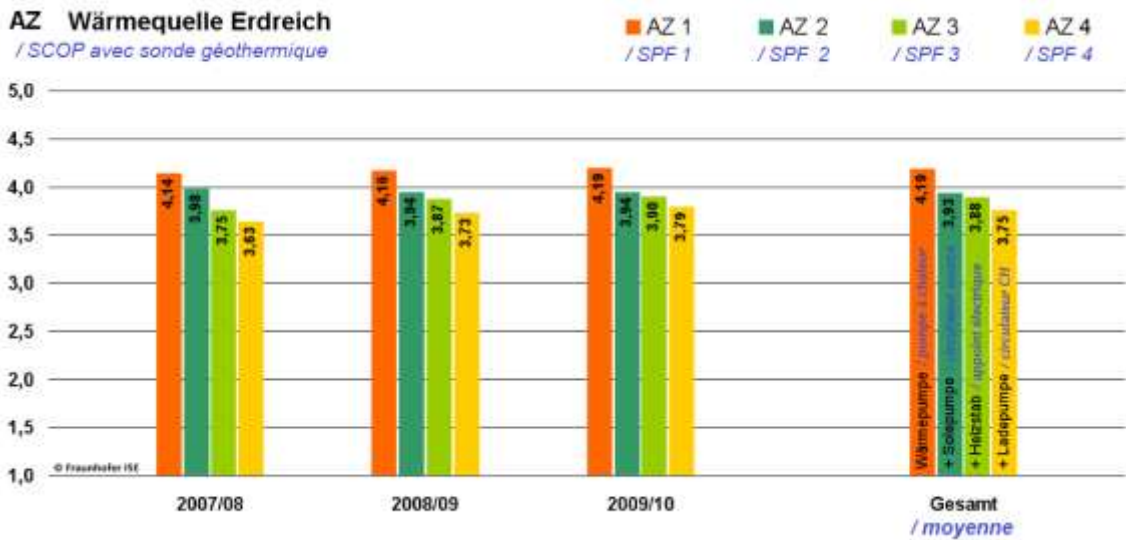


Figure 215 : Influence des auxiliaires dans le SCOP (correction faite sur les numérotations d'indice des AZ)

Le graphique en Figure 216 présente la synthèse détaillée des résultats mesurés sur les PAC air-eau de la campagne [source 4]³⁵. Les SCOP varie de 2,5 à 4,6 pour les PAC double-service et entre 1,5 à 4,9 pour les PAC simple-service. Deux PAC double-service avec appoint solaire pour l'une et appoints gaz pour l'autre, dotées d'une régulation « SMART », obtiennent un SCOP de 2,9 et 2,7 (voir l'extrémité du graphique).

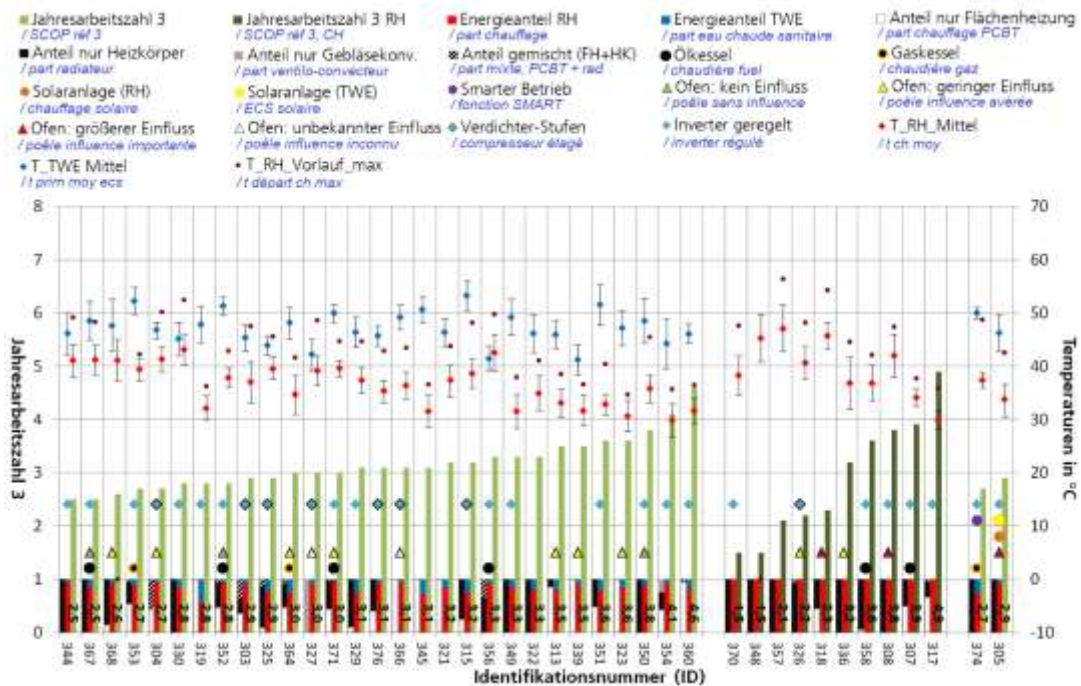


Figure 216 : Synthèse des résultats sur les PAC air/eau de la campagne [source 4]³⁵ du Fraunhofer.

Le graphique ci-dessous (Figure 216) présente la synthèse détaillée des résultats mesurés sur les PAC géothermique de la campagne. Les SCOP varie de 1,8 à 4,7 pour les PAC double-service et à 3,6 à 3,7 pour les PAC eau/eau sur stockeur de glace.

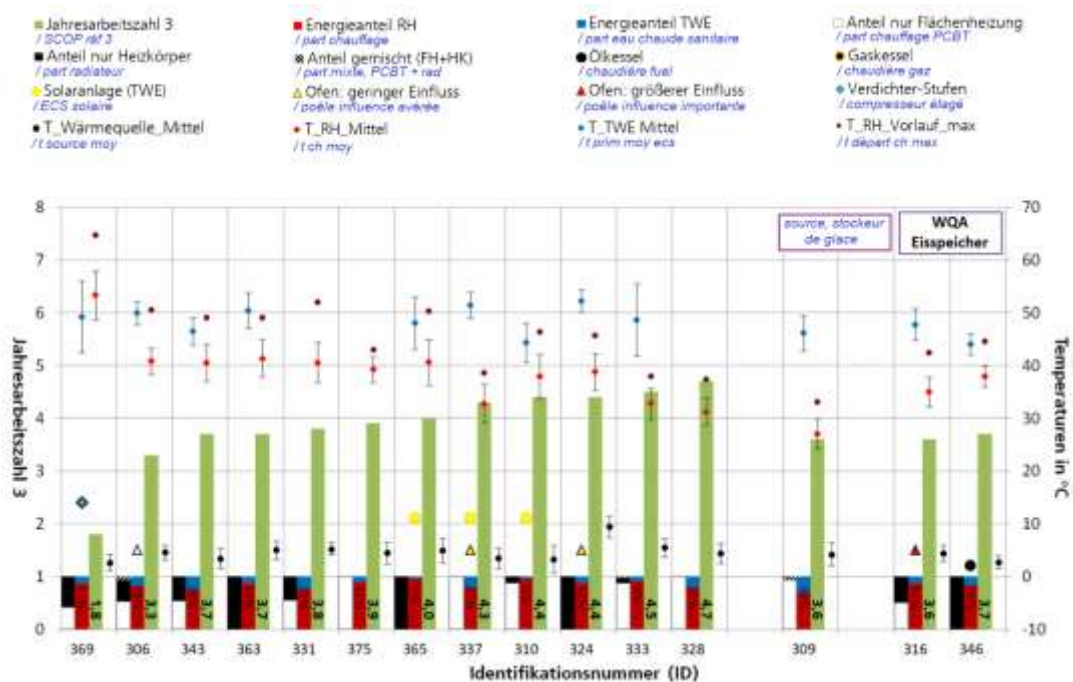


Figure 217 : Synthèse des résultats sur les PAC géothermiques de la campagne [source 4]³⁵ du Fraunhofer

3.2. Autres références

Nous signalons ici d'autres références européennes sur l'évaluation des pompes à chaleur :

- Le rapport *Bericht Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2019/20* (EnergieSchweiz) résume la performance de 23 pompes à chaleur, donc 11 PAC géothermique et 12 PAC air/eau dans la période de 2019 à 2020 en suisse. Un mauvais réglage des lois d'eau est constaté.
- Le rapport, *Nicht jede Wärmepumpe trägt zum Klimaschutz* (agenda 21, Gruppe Energie Lahr) résume la performance de 32 pompes à chaleur, donc 13 PAC géothermique, 7 PAC eau/eau et 12 PAC air/eau d'octobre 2006 à septembre 2008 dans la région de la forêt noire en Allemagne.
- Le rapport *Feldmessung von Wärmepumpen-Anlagen, Ergebnisse Periode 2016-2019* (Wärmepumpen-Testzentrum - WPZ) résume la performance de 11 pompes à chaleur, donc 4 PAC géothermiques et 7 PAC air/eau de 2016 à 2019 en Suisse.
- Le rapport : *Annex 37, Demonstration of Field Measurements of Heat Pump Systems in Buildings*, réalisé et publié par IEA Heat Pump Centre en Suède en 2016, Report no. HPP-AN37-1, lien : <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/demonstration-of-field-measurements-of-heat-pump-systems-in-buildings-good-examples-with-modern-technology-final-report/>
 - o Projet européen dans la continuité du SEPOMO projet
 - o 6 PAC air/eau et 6 PAC géothermiques ont été analysées donc 5 PAC en Suisse, 4 PAC en Angleterre et 3 PAC en Suède. L'objectif est d'évaluer sur le terrain la réduction de CO₂équ avec des PAC fonctionnelles, la performance en SPF 1 à 4 et le coût de fonctionnement.
 - o Le SCOP en SPF3 varie de 2,6 (PAC air/eau en Suisse) à 4,7 (PAC géothermique avec sonde verticale en Suisse).
- Le rapport : *SEPOMO : SEasonal Performance factor and MOnitoring for heat pump systems in the building sector, SEPOMO-Build FINAL REPORT* (R. Norman, juillet 2012), supporté par Intelligent Energy Europe
 - o Projet de mesure réalisé de 2009 à 2012 en Allemagne, Autriche, Grèce, Pays Bas, France et Suède, pour permettre d'établir les définitions des facteur SPF 1 à SPF4 dans un consensus européen basé sur des enseignements de mesure terrain.

- 52 sites instrumentés mais seulement 44 sets de données exploitables.
 - Installations comportant en majorité des planchers chauffants, des PAC air/eau, sur nappe et géothermiques
 - 8 PAC présentent un SCOP en SPF 3 de 2,6 ; 4 PAC entre 2,6 et 3 ; le reste au-dessous de 3 avec une PAC sur nappe en simple service présentant un SCOP en SPF3 de 7,3 !
- Le rapport : *Detailed analysis from the second phase of the Energy Saving Trust's heat pump field trial* (Energy Saving Trust, mai 2013) présenté par : "Department of Energy and Climate Change", lien : https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7f09a0e5274a2e87db3727/analysis_data_second_phase_est_heat_pump_field_trials.pdf
 - Entre 2009 à 2010, le projet a été financièrement soutenu par des fournisseurs d'énergie et des fabricants de PAC et de composant frigorifiques
 - Analyse de 83 PAC air/eau et géothermiques sur radiateurs ou PCBT

SYNTHESE DU PROJET

Cette campagne de mesures a permis d'évaluer les performances de 100 pompes à chaleur en maison individuelle, posées en remplacement d'une chaudière. L'échantillon constitué à partir d'une base de données du ministère, ne contient presque exclusivement que des logements qui ont touché des CEE pour l'installation de leur pompe à chaleur. Un des objectifs du recrutement était d'avoir le minimum d'appoints possible (poêle, insert, etc.) en plus de la PAC.

Au total 2094 voies de mesure – non intrusives – ont été déployées dans les 100 logements pour suivre la consommation globale de la PAC avec séparation de l'appoint électrique, la production de chaleur avec séparation du chauffage et de l'ECS, quelques températures techniques, la température ambiante du séjour et la température extérieure (ou captage géothermique). Les mesures ont été effectuées au pas de temps de 1 minute pendant une à deux années sur chaque installation. Ce pas de temps très fin s'est avéré nécessaire pour séparer convenablement les usages « chauffage » et « ECS » et permettre d'identifier les phénomènes de cyclage.

L'instrumentation des logements s'est déroulée en binômes et comprenait le recueil d'informations auprès de l'occupant (contexte, degré de satisfaction, usage, etc.), un ensemble de relevés techniques sur l'installation et la pose des instruments de mesure. Une deuxième visite « enveloppe » a permis d'effectuer les relevés nécessaires à la caractérisation précise de la déperdition du bâti.

Le recrutement et l'instrumentation se sont déroulés sur 6 mois, de septembre 2023 à janvier 2024.

Nous résumons ici les principales caractéristiques de l'échantillon :

Les logements

- 100 maisons individuelles situées dans toute la France (20 départements) : 51 logements en zone climatique H1, 39 logements en zone H2 et 10 logements en zone H3.
- Occupation moyenne 2,44 personnes par foyer ; surface habitable moyenne 152 m² (médiane 136 m²).
- 5 logements se trouvent en altitude (le plus élevé à 1080m).
- Les logements présentent des niveaux de déperditions très variés, allant de la maison passive à la maison non isolée, avec tous les niveaux intermédiaires.

Les pompes à chaleur

- 90 PAC air/eau et 10 PAC eau/eau issues de 23 fabricants.
- 61 PAC double-service (dont 6 PAC eau/eau) et 39 PAC simple-service.
- Puissance thermique de 4 kW à 17 kW (puissance pour une production à 45°C et à température de base du site).
- 5 fluides frigorigènes différents (R410A ; R407C ; R134A ; R32 ; R290) ; 22 PAC monobloc ; 36 PAC haute ou très haute température.
- 34 installations avec pose d'une bouteille de découplage (moyenne 89 litres) et 15 installations avec pose d'un ballon tampon en série (moyenne 65 litres).
- 15 installations sur plancher chauffant (dont 7 en PAC eau/eau), 76 installations sur radiateurs (dont 2 PAC eau/eau) et 9 installations mixtes radiateurs (dont 1 PAC eau/eau).

Cette campagne a produit un nombre considérable de données qui seront fournies en open data à l'issue du projet.

L'étude des données présentée dans ce document s'est donnée pour objectif de faire une photographie la plus complète possible des performances des PAC sur le terrain et des principaux facteurs d'influence. Elle met en lumière plusieurs points-clés et recommandations pour améliorer les SCOP, le confort d'utilisation et la pérennité des installations.

CHAUFFAGE

Les SCOP mesurés montrent **de bonnes performances pour le chauffage**, avec des valeurs moyennes de **2,9 pour les PAC air/eau** et **4,3 pour les PAC eau/eau**. Ces mesures ont eu lieu sur un hiver plutôt clément et pourraient être dégradées de 15 à 20% (un demi-point de COP) sur un hiver très rigoureux comme celui de 2021, point qui devra être approfondi avec la prolongation des mesures sur plusieurs années.

La grande variabilité des résultats entre les logements attire à la fois l'attention sur des **dysfonctionnements et des marges d'amélioration significatives**, mais aussi sur des **performances parfois spectaculaires avec des SCOP supérieurs à 4 pour certaines PAC air/eau** et de **7,4 pour une PAC eau/eau sur sondes verticales**, qui fixent un horizon prometteur. (§2.1.1)

Pour les PAC air/eau (SCOP moyen 2,9 ; min 0,9 ; max 4,5), les résultats sont bons en moyenne mais **très contrastés**. Certaines PAC air/eau présentent des SCOP spectaculaires, supérieurs à 4, dont les trois meilleurs (4,54 ; 4,35 ; 4,12) sont des logements avec une installation sur radiateurs, ce qui est remarquable. Le meilleur SCOP en PAC air/eau sur radiateur situé en zone H1 est de 3,59. En plancher chauffant, deux des 3 meilleurs SCOP (4,10 ; 4,02 ; 3,91) se trouvent en zone H1.

On déplore à l'inverse en PAC air/eau 7 SCOP inférieurs à 2 (le plus faible, inférieur à 1, étant une panne avérée), 31 SCOP inférieurs à 2,5 et 52 SCOP inférieurs à 3,0. Les analyses unitaires menées lors de la réalisation des fiches pour les occupants ont montré que des SCOP inférieurs à 3,0 offrent en général une ou des piste(s) d'optimisations significatives.

Pour les PAC eau/eau (SCOP moyen 4,3 ; min 2,3 ; max 7,4), nous mesurons une **avance assez nette des sondes verticales par rapport aux autres types de captage géothermiques**. Les PAC sur eau de nappe souffrent de la puissance importante de leur pompe de nappe, les sondes horizontales et les corbeilles présentent des températures de source froide moins constantes et plus froides (leur température de source froide n'est pas toujours plus chaude que l'air extérieur). (§2.1.3.3)

Les PAC double-service sont **10% plus performantes que les simple-service** (0,4 points de COP). Une première piste d'explication pourrait être la conception qui n'est pas identique, avec possiblement des différences au niveau des échangeurs qui présenteraient des pincements différents. Une seconde piste serait liée au nombre d'heures de fonctionnement plus élevé pour les double-services (présence de cycles de production ECS) qui permettrait d'éviter statistiquement plus souvent les baisses de COP des compresseurs au début des cycles de chauffage. Ces éléments n'ont pas pu être confirmés lors des réunions techniques de copil. (§2.1.3.1)

La part des résistances d'appoint, du dégivrage et des auxiliaires hors production de chaleur est **faible à l'échelle de l'échantillon (environ 7%)**, ce qui est un bon résultat. Malgré une vague de froid assez significative en janvier 2024, les résistances d'appoint représentent 2,7% de la consommation d'électricité totale, ce qui est plutôt négligeable. La consommation d'électricité liée au dégivrage n'est pas un sujet. **En rentrant dans le détail des logements, l'échantillon regroupe des situations très disparates avec quelques dysfonctionnements importants.** (2.1.3.4 et 2.1.3.1)

L'analyse de la sensibilité du COP « moyen vu du réseau » à la température extérieure montre que ce dernier culmine en moyenne à 3,3 aux alentours de 13-14°C de température extérieure moyenne. **Un SCOP de 2 serait obtenu selon nos données jusqu'à -8,5°C de température extérieure (ce qui est remarquable)**. Aucune cassure de pente n'est visible sur un éventuel effet des résistances électriques d'appoint aux températures froides. (§2.2.3.2)

Lors de la vague de froid mesurée le 20/01/2024, la **puissance appelée sur le réseau électrique a été réduite de 49% par comparaison à du chauffage à effet joule pur, avec un COP moyen mesuré proche de 2.** (§2.2.3.3)

Le pic d'appel de puissance électrique des PAC a néanmoins conduit, en moyenne, à **une multiplication par 3,5 du pic de puissance électrique horaire des logements** auparavant équipés d'une chaudière, ce qui doit rester un point d'attention pour la gestion du réseau électrique en cas de massification du système. (§5)

Cette constatation est cohérente avec la comparaison aux données du Panel Elecdom : vu du réseau, sur l'hiver et par rapport à un logement ne disposant pas de chauffage électrique, une PAC occasionne **un**

déplacement du pic de la courbe de charge en début de matinée (autour de 7 heures du matin) et l'augmentation de l'amplitude de ce pic d'un facteur 3 à 3,5. (§2.2.3.4)

La moyenne des températures ambiantes dans les séjours s'élève à 19,9°C à l'échelle de l'échantillon. Cette valeur est classique en maison individuelle et ne dénote pas d'un « effet rebond » particulier lié à l'installation des PAC. Les réduits nocturnes sont constatés sur 23% de l'échantillon et occasionnent une chute de température nocturne de près de 1°C.

Le besoin de chaleur s'élève à 86 kWh_{ut}/m².an en moyenne en incluant les générateurs d'appoint, et 77 kWh_{ut}/m².an pour la PAC seule. Nous estimons que ces chiffres peuvent être considérés comme une fourchette plutôt haute de la moyenne des logements français étant donné que notre échantillon n'est composé que de maisons individuelles, sans aucune maison neuve.

La consommation d'électricité des PAC pour le chauffage s'élève en définitive à 28 kWh_{él}/m².an en moyenne, avec une disparité forte : on observe un rapport 21 entre la consommation la plus faible (5,3 kWh_{él}/m².an) et la consommation la plus importante (112 kWh_{él}/m².an).

Pour améliorer l'efficacité énergétique des installations sur le chauffage, plusieurs recommandations pratiques ont été formulées au regard des observations de terrain et de l'analyse des mesures :

1. **Ajustement des lois d'eau :** Une marge d'optimisation du réglage de la loi d'eau est identifiée dans de nombreuses habitations (§2.1.3.2). **La détermination et le réglage des lois d'eau dans les logements individuels ne sont pas maîtrisés aujourd'hui par les installateurs lors de la mise en service**, comme le montre l'absence de corrélation nette entre la température de production du chauffage et la déperdition surfacique du bâti ou la zone climatique. Ce sujet est un sujet de premier plan et une méthode opérationnelle de réglage doit rapidement être proposée et applicable par les installateurs.

Une autre piste d'optimisation de la loi d'eau - complémentaire à la première - consiste à généraliser l'option de la « correction d'ambiance » (compensation dynamique de la température de départ chauffage en fonction de l'écart constaté sur le thermostat d'ambiance - voire pilotage de la loi d'eau uniquement sur cet écart), encore non présent sur une part significative des PAC du marché. (§2.1.3.2).

2. **Limitation du cyclage :** Un cyclage très important d'un grand nombre de PAC est mesuré sur l'échantillon. La multiplication des démarrages/arrêts induit une **dégradation des performances** de la PAC et une **usure prématurée du compresseur** à court ou moyen terme. **Les problèmes de cyclages rencontrés ne sont pas corrélés au surdimensionnement des PAC**. L'origine du problème de cyclage serait donc lié à des **problèmes de régulations propres aux machines** (cyclages excessifs vus en particulier chez certains fabricants) mais aussi à des **problèmes de réglage ou de mise en œuvre dans certains cas**. Des discussions sont en cours avec les principaux fabricants concernés pour trouver l'origine du cyclage récurrent de leurs PAC. (§2.1.3.5).

A ce titre, il nous semblerait primordial de proposer un menu dans les PAC permettant de consulter l'**historique du nombre de cycles par jour**, et un menu dédié proposant **différents leviers de correction** en cas de valeur élevée (paramètres à modifier, abaissement de loi d'eau, etc.). (§2.1.4)

3. **Limiter les consommations hors production :** Des **veilles anormalement élevées** ont été observées de façon récurrente sur les PAC de certains fabricants. Ces veilles excèdent les 50W dans 15% des cas, elles dépassent même les 100W dans certains logements, ce qui est **considérable pour un équipement domestique**. Les pires cas se concentrant sur certains fabricants, un **problème inhérent à la machine ou de paramétrage** ne peut être écarté. Des échanges et des visites de sites sont en cours avec eux pour apporter des explications à l'origine de ces dysfonctionnements. **L'amélioration des puissances de veille devra toutefois nécessairement passer par une réglementation plus stricte sur ce type d'équipement au niveau européen**. Dans les cas où les puissances hors production sont élevées (disons supérieures à 10W), couper ou disjoncter les PAC simple service hors saison de chauffe nous paraît recommandable. (§2.1.3.6)

4. **Réglage des circulateurs :** Les consommations des circulateurs sont excessives dans de nombreux cas. Par comparaison, elles sont en moyenne deux fois plus importantes que celles observées en chaudière murale gaz. Les **débits de production du chauffage sont trop importants**, ce qui nuit probablement au COP car le retour PAC se trouve plus chaud et la consommation des auxiliaires augmente. Les durées de fonctionnement des pompes sont également parfois mal maîtrisées (circulateurs permanents, temporisations trop longues). Le sujet du meilleur réglage et paramétrage des pompes lors de la mise en service des installations doit être abordé. (§2.1.3.7)

Par ailleurs le **nombre de pompes** est impactant sur la consommation de ce poste, ce qui est en lien avec le point qui suit.
5. **Amélioration de la conception hydraulique et de l'équilibre des bouteilles de découplage :** L'étude montre qu'il est préférable d'éviter les configurations avec une bouteille de découplage sauf lorsqu'il y a plusieurs départs de chauffage et que la PAC ne peut pas les gérer directement. Ceci permettrait de limiter le nombre de pompes (intérêt vu au point précédent) et d'éviter les problèmes d'équilibre hydraulique vus de manière quasiment systématique sur les mesures. En cas de nécessité de mise en place d'une bouteille l'équilibre primaire/secondaire doit être soigneusement réglé et s'adapter de manière dynamique en cas de changement de débit au secondaire. Ce point très technique est à adresser aux fabricants et aux installateurs. (§2.1.3.7)
6. **Réglage et optimisation des programmations horaires et du fonctionnement de l'unité extérieure :** Concentrer les périodes de production du chauffage en journée, où la température extérieure est plus clémente, améliore l'efficacité des PAC. La sensibilisation des installateurs et des usagers sur l'importance de l'intégration des unités extérieures pour éviter les recyclages d'air et améliorer l'efficacité des PAC permettraient de soigner les conditions de fonctionnement des unités extérieures. (§2.1.4)
7. **Maintenance Régulière :** Ajouter une composante « performance énergétique » lors de la visite de maintenance annuelle peut aider à affiner les réglages et à maintenir la performance des PAC. Cela inclut la vérification des compteurs de cycles (à implémenter par les fabricants), la mesure de la veille, l'ajustement de la loi d'eau, et l'abaissement de la consigne ambiante. (§2.1.4)
8. **Appui au développement du fluide R290 ?** Ce fluide au GWP très faible (GWP = 3) montre dans la campagne d'excellents résultats de COP, avec une efficacité de Carnot de 0,34 contre 0,30 pour les autres fluides en PAC air/eau, ce qui représente un avantage net de 13% « toutes choses égales par ailleurs ». Ce double avantage environnemental pourrait ouvrir la discussion sur l'appui éventuel de son développement par les pouvoirs publics.

EAU CHAUDE SANITAIRE

Concernant l'eau chaude sanitaire (ECS), les résultats sont plus décevants, avec un SCOP ECS mesuré de 2,0 pour les PAC air/eau et de 2,3 pour les eau/eau. Avec près de la moitié de l'échantillon présentant un SCOP inférieur à 2, la PAC air/eau est probablement légèrement moins performante que les chauffe-eaux thermodynamiques individuels (CETI).

Par ailleurs, alors que certains dysfonctionnements engendrent des SCOP ECS inférieurs à 1 sur 3 logements, des SCOP entre 2,5 et 3 ont aussi été mesurés sur les installations les plus performantes.

Ces éléments n'entendent pas conclure qu'il faille privilégier les configurations « PAC simple service + CETI » au détriment des configurations « PAC double-service » (d'autant plus que ces dernières présentent de meilleurs SCOP de chauffage, comme évoqué précédemment), mais plutôt que des marges d'améliorations significatives existent sur ce poste. (§3.1.1)

Un tiers de la consommation électrique du poste ECS est attribuable aux résistances d'appoint (17%) et aux consommations hors production (15,3%). Le dégivrage reste quant à lui anecdotique.

L'appoint joule représente de 0 à 100% de la consommation d'électricité pour l'ECS, montrant à la fois des installations où son utilisation est maîtrisée et d'autres relevant de lourds dysfonctionnements. (§3.1.2.3)

Le besoin de chaleur associé à l'eau chaude sanitaire est en moyenne 7 fois inférieur à celui du chauffage, avec un besoin moyen mesuré à 1614 kWhut soit 11 kWhut/m² (dispersion 1 à 8, principalement liée au nombre de personnes du foyer), et une consommation électrique associée de 800 kWhél soit 5,5 kWhél/m² (dispersion 1 à 10). (§3.23.2.1)

Les pistes d'économies identifiées sur l'eau chaude sanitaire sont aussi nombreuses :

1. **Limitation des consommations électriques hors production :** La limitation du fonctionnement de l'appoint joule, des circulateurs hors production et des veilles est un facteur de performance de production d'ECS. Dans les cas où son déclenchement se fait de façon intempestive, il est à se demander s'il n'est pas préférable de désactiver la résistance électrique d'appoint en base. (§3.1.2.3)
2. **Diminution des températures de consigne et des volumes de stockage :** Les volumes de stockage des ballons ECS des PAC valant 200L en général, une marge probable de baisse de la consigne d'ECS est identifiée dans au moins un bon quart des logements. Le travail du compresseur pour le simple maintien en chauffe d'un ballon peu sollicité (très probable lorsqu'il fait 200L) se fait à très mauvais COP. Ainsi, il nous semble souhaitable que les fabricants proposent une gamme plus large de volumes de stockage d'ECS, avec par exemple des ballons de 100L ou de 150L, qui sont largement suffisants à 55°C pour deux personnes. (§3.1.2.2)
3. **Maîtrise de la température de charge :** Une marge sur la température de charge est identifiée dans certains cas : parfois cette température est très élevée pour une consigne donnée, les maximums excèdent les 75°C dans certains logements. (§3.1.2.2)
4. **Réglage et optimisation des programmations horaires :** De nombreux logements n'ont pas de programme horaire sur la production d'ECS, alors que les volumes de stockage associés à des consignes raisonnables (55°C pour suivre les recommandations des Agences de Santé) permettraient de concentrer la recharge des ballons en début d'après-midi, où la température extérieure est plus clémente, où l'efficacité de production est meilleure et le recours à la résistance d'appoint moins « nécessaire ». Ce décalage sera de plus cohérente avec les nouvelles plages attendues de tarifs Heures Pleines/Heures Creuses annoncées en journée. (§3.1.2.3)
5. **Economies sur les puisages :** Des économies pourraient sans doute être réalisées sur l'usage grâce à des équipements hydro-économes (réducteurs de débit n'entraînant pas de sensation d'inconfort d'utilisation) et des écogestes ciblés sur les usages cuisine et douche/bain. (Voir l'étude Ademe *Stratocumulus* à ce sujet)

RAFRAICHISSEMENT

Les consommations liées au rafraîchissement - passif ou actif - dans l'échantillon sont assez anecdotiques, tant sur le nombre de logements concernés que sur les niveaux de consommation :

- Seul 10% de l'échantillon a utilisé du rafraîchissement, alors que 25% avait la possibilité technique de le faire.
- Sur les données disponibles des logements ayant rafraîchi, seuls 5 logements ont dépassé un besoin de 5 kWhut/m² sur au moins l'un des deux étés 2024 ou 2025. La moyenne des besoins de froids mesurés sur les données disponibles, tous logements et étés confondus, est de 7 kWhut/m².
- Sauf cas exceptionnel les consommations restent donc très faibles, avec une moyenne de 0,5 kWhél/m² pour le géocooling et 3,6 kWhél/m² pour le froid actif.

Les EER de production de froid des PAC air/eau s'établit en moyenne à 1,9 sur les données disponibles (min 1,8 ; max 2,0), ce qui est assez nettement inférieur aux SCOP mesurés sur le chauffage.

PART RELATIVE DES CONSOMMATIONS CHAUFFAGE/ECS

La chaleur produite pour le chauffage est 7 fois supérieure à celle de l'eau chaude sanitaire pour les PAC double-service, ce qui montre la prépondérance du sujet chauffage sur l'ECS. (§3.2.2)

L'électricité consommée pour le chauffage est toujours prépondérante sur celle de l'ECS, mais dans une proportion moins élevée que pour la chaleur (**facteur 4**), du fait de la plus faible valeur du SCOP ECS. (§3.2.4)

Avec 4 264 kWh_{él} par unité, la consommation moyenne d'une PAC représente la moitié de la consommation électrique d'un logement équipé. Plus précisément, cette part vaut **47% pour les PAC simple service**, et **58% dans le cas des double-service** (46% pour le chauffage et 12% pour l'ECS). (§5)

TEMPS DE RETOUR SUR INVESTISSEMENT

Sur notre échantillon de logement, le surcoût lié au remplacement d'une chaudière gaz par une PAC plutôt que par une nouvelle chaudière est amorti en **2 ans après déduction des aides**. Sans les aides, le TRI se situe plutôt autour de **6 ans** (en médiane). Cette conclusion montre bien la **puissance des aides** sur l'intérêt économique d'installer une PAC.

L'influence du SCOP est centrale dans la diminution du TRI de l'installation d'une PAC, d'où la nécessité de **tout mettre en œuvre pour que le SCOP des PAC installées chez les particuliers soit le meilleur possible pour leur permettre de rentrer dans leurs frais à court ou moyen terme**.

COMPARAISON DES RESULTATS AUX CALCULS 3CL et ERP

Calcul 3CL : Pour les PAC air/eau, les SCOP par défaut du calcul 3CL sont assez fidèles à la réalité pour les installations avec radiateur mais sous-évaluent les SCOP des installations avec planchers chauffant.

Calcul ERP : La comparaison aux mesures montre que les SCOP ERP de la zone A (zone privilégiée par les obligations de certification) sont en moyenne 17,3% supérieurs aux SCOP mesurés. Plusieurs points ressortent de l'analyse et invitent à actualiser certains paramètres du modèle ERP :

- **Loi d'eau** : Des études sur des cas particuliers montrent des écarts sensibles entre la loi d'eau prise comme hypothèse dans le calcul de l'ERP et les valeurs mesurées.
- **Conditions météo** : il n'existe aucune source établissant une correspondance claire entre les 3 zones climatiques de l'ERP (C,A,W) et les régions climatiques réglementaires françaises. La zone climatique A (moyenne) est privilégiée aujourd'hui mais en pratique la zone climatique W (chaude) semblerait plus adaptée pour les régions côtières de l'Atlantique et de la méditerranée, tandis que la zone la plus froide (C) serait plutôt adaptée pour les zones montagneuses.
- **Les facteurs correctifs de modulation et d'intermittence** : ces facteurs ont pour but de dégrader les COP mesurés en laboratoire afin de traduire les phénomènes instationnaires observés en fonctionnement réel. L'analyse montre que leurs valeurs sont trop optimistes par rapport à ce qui est mesuré sur le terrain.
- **La prise en compte des veilles** : Les faibles niveaux de puissances de veilles déclarés dans l'ERP n'ont pas une influence importante sur le SCOP global calculé. Pourtant des puissances électriques hors production significatives ont été mesurées sur une partie de l'échantillon des 100 PAC (veilles de cartes mais aussi temporisation excessive de certains auxiliaires) et pèsent lourd sur le SCOP de certaines installations.

COMPARAISON DES RESULTATS AUX AUTRES CAMPAGNES EUROPEENNES

De nombreuses études de terrain ont été menées sur les pompes à chaleur, principalement en Allemagne et depuis 2005. Les résultats de la dernière campagne *WPsmart im Bestand* nous montrent essentiellement les résultats de 29 PAC air/eau double-service, 12 PAC géothermiques et 2 PAC eau/eau sur stockage de glace, de juillet 2018 à juillet 2019.

Concernant les PAC air/eau (toutes double-service), le SCOP moyen de 3,16 (hors circulateur de chauffage) mesuré avec une température de production moyenne de 39,3°C (même ratio de PCBT que sur 100 PAC) et une température extérieure moyenne de 4,5°C, nous indique :

- Qu'à périmètre Carnot équivalent, l'efficacité de production des PAC en Allemagne est environ 15% supérieure à celle qu'on observe en France.

- Que les lois d'eau en Allemagne sont probablement mieux réglées et/ou les émetteurs plus généreusement dimensionnés car les niveaux de températures de production de chauffage sont similaires alors que le climat est assez nettement plus froid.

Ces deux tendances portent à environ + 30% le résultat de SCOP allemand par rapport à ce qui aurait été mesuré sur les 55 PAC air/eau double-service de l'échantillon 100 PAC dans les mêmes conditions climatiques. Cela qui confirme l'existence de marges d'optimisation importantes sur le parc français.

Quelques pistes d'explications possibles les SCOP allemands « chauffage + ECS » plus élevés en SPF3 :

- L'utilisation de générateurs de secours aux températures les plus froides en Allemagne ?
- Des SCOP ECS meilleurs (les résultats 100 PAC étant assez moyens sur cet usage) ;
- Plus d'heures de fonctionnement (hivers plus longs et rigoureux) ce qui allonge mécaniquement les cycles et donc améliore l'efficacité moyenne des compresseurs ;
- Moins de phénomènes de cyclages liés à des défaut de régulation et paramétrage ;
- Des puissances de veilles mieux maîtrisées (ce qui semble être le cas).

Enfin une analyse de l'impact des circulateurs de chauffage sur le SCOP dans une étude du Fraunhofer de 2009/2010, tend à confirmer la surconsommation des circulateurs observée sur 100 PAC : impact sur le SCOP de +0,13 point dans la campagne du Fraunhofer ; impact de +0,26 point dans la campagne 100 PAC.

RECOMMANDATIONS A L'ENSEMBLE DES ACTEURS DE LA FILIERE

L'étude permet d'aboutir aux recommandations suivantes :

CHAUFFAGE	Réglementation /Institutionnels	Fabricants	Installateurs/ Mainteneurs
1 Améliorer le réglage des lois d'eau dans les logements, privilégier la régulation avec correction d'ambiance.	X	X	X
2 Travailler à diminuer le nombre de cycles marche/arrêt		X	X
3 Travailler sur les choix hydrauliques en n'installant des bouteilles de découplage qu'en cas de nécessité (plusieurs départs que la PAC ne peut pas gérer en direct)		X	X
4 Consommation excessive des circulateurs : mieux régler les temporisations, limiter le nombre de circulateurs (cf. point 3)		X	X
5 Limiter les veilles des machines à quelques Watts (sujet des cartes électroniques mais aussi des paramétrages sur site)	X	X	X
6 Permettre à l'utilisateur une possibilité simple de couper sa PAC (PAC simple-service en été, absence prolongée, etc.).		X	
7 Conseiller aux occupants de paramétrer un réduit nocturne pour diminuer le besoin de chauffage, améliorer le SCOP et diminuer le nombre de cycles (point 2).			X
8 Soigner les installations *			X
9 Mieux monitorer le fonctionnement**	X	X	
10 Réglementation 3CL: actualiser les valeurs de SCOP par défaut du calcul 3CL (notamment pour les planchers chauffants).	X		
11 Réglementation ERP : intégrer les régulations d'ambiance dans les tests de certification (par exemple à l'aide d'un banc de test virtuel), y compris des compensations d'ambiance sur les lois d'eau quand elles existent, de manière à reproduire le fonctionnement réel des PAC (cyclage des régulations et modulation de puissance)	X		
12 Réglementation ERP : actualiser le paramétrage des modèles au regard des mesures de terrain : climat, loi d'eau, facteurs de modulation et de cyclage, veilles.	X		

* éviter le recyclage de l'unité extérieure, mieux calorifuger les installations, vérifier les équilibres primaire/secondaire si bouteille de découplage, soigner le réglage de la loi d'eau et de la résistance d'appoint, proposer un réglage ECS à 52°C de consigne avec programmation horaire de jour

*** Lors de la visite de maintenance, ajouter une composante « performance énergétique » : vérifier les compteurs de cycles, mesurer la veille (estivale !), ajuster la loi d'eau, proposer un ralenti de nuit, un abaissement de consigne ambiante, etc.*

ECS	Réglementation /Institutionnels	Fabricants	Installateurs/ Mainteneurs
1 Réglage 55°C de consigne ET programmation de jour		X	X
2 Désactiver de la résistance d'appoint en base		X	X
3 Optimiser les régimes de températures de production ECS dans les régulations (éviter les températures de charge exagérément élevées en optimisant la puissance de charge)		X	
4 Limiter les veilles des machines à quelques Watts (sujet des cartes électroniques mais aussi du paramétrage sur site)	X	X	X
5 Proposer des volumes de stockage ECS de 100 ou 150L en ballon intégré (suffisant à 52°C pour 2 pers)		X	

CONCLUSION

Cette étude met en évidence le potentiel des PAC pour améliorer l'efficacité énergétique des logements, tout en soulignant les leviers d'optimisation pour maximiser leurs performances. Les recommandations formulées dans ce rapport offrent des pistes concrètes pour améliorer l'efficacité des installations existantes et à venir et actualiser les paramétrages des différents modèles réglementaires.

Nous pensons qu'un SCOP chauffage moyen mesuré de 3 minimum est atteignable avec des réglages optimisés sur toutes les installations, point qui sera approfondi avec l'étude complémentaire des données déclenchée par RTE.

La marge globale d'amélioration est ainsi d'une vingtaine de pourcents à l'échelle de l'échantillon, potentiellement beaucoup plus au cas par cas, ce qui ouvre d'énormes perspectives d'évolution pour l'ensemble de la filière.

4. Annexes

4.1. Caractéristiques des 100 sites instrumentés

Logt	Simple/double service	Ballon ECS déporté ou intégré ?	Type de PAC	ALTITUDE	Température de base	SHAB	P déperdition BE	Type d'habitation	T°C max production chauffage SANS appoint	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 35°C	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 45°C	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 55°C	Volume stockage ECS si intégré (L)	emetteurs	Volume bouteille chauffage	Volume ballon tampon chauffage	Volume ballon ECS si déporté
001026	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	210 m	-7 °C	185 m²	12 067 W	Maison Individuelle	60,0	10,9 kW	10,1 kW	8,1 kW	sans objet	Plancher	200 L		
002026	Double service	déporté	air/eau bi-bloc haute T	263 m	-7 °C	168 m²	10 963 W	Maison Individuelle	80,0	11,8 kW	14,5 kW	14,5 kW	sans objet	Plancher et radiateurs Acier/Alu	40 L		200 L
003026	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	145 m	-6 °C	69 m²	3 592 W	Maison individuelle	60,0	10,0 kW	9,4 kW	8,8 kW	200 L	Radiateurs Acier/Alu	52 L		
004026	Simple service	sans objet	air/eau monobloc	86 m	-6 °C	89 m²	11 809 W	Maison Mitoyenne	70,0	10,7 kW	10,7 kW	11,0 kW	sans objet	Radiateurs Fonte		90 L	
005026	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	158 m	-6 °C	111 m²	8 354 W	Maison individuelle	55,0	9,0 kW	9,0 kW	9,0 kW	185 L	Radiateurs Acier/Alu		90 L	
006075	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	110 m	-7 °C	88 m²	8 235 W	Maison Mitoyenne	57 °C	12,0 kW	12,0 kW	11,2 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu	50 L		
007075	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	41 m	-7 °C	75 m²	7 947 W	Maison Mitoyenne	60,0	8,9 kW	8,6 kW	8,0 kW	sans objet	Radiateurs Fonte et Acier/Alu		250 L	
008075	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	58 m	-7 °C	136 m²	13 949 W	Maison Individuelle	60,0	9,3 kW	9,0 kW	8,6 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu		51 L	
009075	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	60 m	-7 °C	114 m²	14 435 W	Maison individuelle	60,0	11,8 kW	11,6 kW	9,2 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu		50 L	
010075	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	107 m	-7 °C	135 m²	7 289 W	Maison Mitoyenné	60,0	10,0 kW	9,5 kW	8,7 kW	sans objet	Radiateurs Fonte		50 L	
011088	Double service	déporté	air/eau bi-bloc	410 m	-16 °C	163 m²	20 185 W	Maison Individuelle	55,0	6,8 kW	Hors plage	Hors plage	sans objet	Plancher		45 L	190 L
012088	Double service	déporté	air/eau monobloc	436 m	-16 °C	136 m²	17 860 W	Maison Mitoyenne	65,0				sans objet	Radiateurs Acier/Alu	Non connu		114 L
013088	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	320 m	-15 °C	123 m²	6 130 W	Maison Mitoyenne	60,0	4,9 kW	4,3 kW	Hors plage	220 L	Plancher			
014088	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	379 m	-15 °C	123 m²	7 115 W	Maison Individuelle	60,0	4,9 kW	4,3 kW	Hors plage	220 L	Plancher et radiateurs Acier/Alu			
015088	Double service	intégré	air/eau monobloc	393 m	-15 °C	79 m²	4 127 W	Maison Individuelle	70,0	9,2 kW	9,4 kW	9,7 kW	230 L	Radiateurs Fonte	50 L		
016067	Double service	déporté	air/eau bi-bloc	128 m	-15 °C	142 m²	33 231 W	Maison Individuelle	70,0	9,7 kW	9,4 kW	9,0 kW	sans objet	Plancher et radiateurs Acier/Alu	Non connu		190 L
017067	Simple service	sans objet	air/eau monobloc	143 m	-15 °C	332 m²	28 239 W	Maison Individuelle	60,0	19,2 kW	16,9 kW	Hors plage	sans objet	Plancher	51 L		
018067	Simple service	sans objet	eau/eau sonde horizontale	180 m	-15 °C	214 m²	8 375 W	Maison Individuelle	65,0	10,0 kW	9,0 kW	8,7 kW	sans objet	Plancher			
019067	Simple service	sans objet	eau/eau sonde horizontale	186 m	-15 °C	176 m²	11 113 W	Maison Individuelle	65,0	10,0 kW	9,0 kW	8,7 kW	sans objet	Plancher			
020067	Double service	intégré	air/eau bi-bloc haute T	236 m	-15 °C	290 m²	29 849 W	Maison Individuelle	80,0	11,2 kW	16,1 kW	15,5 kW	270 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu	51 L		
021062	Double service	déporté	air/eau bi-bloc haute T	92 m	-9 °C	153 m²	19 065 W	Maison Individuelle	80,0	Hors plage	12,5 kW	12,6 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu		20-30	200 L
022062	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	143 m	-9 °C	93 m²	5 646 W	Maison Individuelle	60,0	5,6 kW	4,9 kW	4,2 kW	220 L	Radiateurs Acier/Alu			
023062	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	25 m	-9 °C	82 m²	12 112 W	Maison Individuelle	60,0	10,7 kW	10,1 kW	7,7 kW	sans objet	Radiateurs Fonte et Acier/Alu			
024062	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	43 m	-9 °C	92 m²	13 897 W	Maison Individuelle	60,0	7,7 kW	7,5 kW	6,7 kW	sans objet	Radiateurs Fonte			
025062	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	63 m	-9 °C	137 m²	8 802 W	Maison Individuelle	55,0	9,6 kW	9,2 kW	8,8 kW	190 L	Plancher	50 L		

Logt	Simple/double service	Ballon ECS déporté ou intégré ?	Type de PAC	ALTITUDE	Température de base	SHAB	P déperdition BE	Type d'habitation	T°C max production chauffage SANS appoint	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 35°C	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 45°C	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 55°C	Volume stockage ECS si intégré (L)	emetteurs	Volume bouteille chauffage	Volume ballon tampon chauffage	Volume ballon ECS si déporté
026069	double service	déporté	air/eau bi-bloc	387 m	-11 °C	89 m²	9 451 W	Maison Individuelle	60,0	12,0 kW	11,3 kW	10,5 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu			261 L
027069	simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	582 m	-13 °C	400 m²	56 509 W	Maison Individuelle	60,0	13,0 kW	11,6 kW	10,0 kW	sans objet	Radiateurs Fonte et Acier/Alu			
028069	double service	intégré	air/eau bi-bloc	170 m	-10 °C	167 m²	9 666 W	Maison Mitoyenne	55,0	9,3 kW	9,2 kW	8,2 kW	A faire	Radiateurs Acier/Alu	40 L		
029069	double service	intégré	air/eau monobloc	278 m	-11 °C	117 m²	11 898 W	Maison Individuelle	70,0	10,0 kW	9,5 kW	9,5 kW	190 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu			
030069	simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	236 m	-11 °C	197 m²	10 915 W	Maison Individuelle	57,0	14,7 kW	14,4 kW	13,5 kW	sans objet	Plancher et radiateurs Acier/Alu	135 L		
031073	Double service	intégré	air/eau monobloc	302 m	-11 °C	270 m²	26 993 W	Maison Individuelle	70,0	11,9 kW	11,8 kW	12,0 kW	230 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu	25 L		
032073	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	482 m	-12 °C	275 m²	24 772 W	Maison Individuelle	56,0	14,4 kW	14,2 kW	12,6 kW	200 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu	50 L		
033073	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	335 m	-11 °C	93 m²	9 002 W	Maison Mitoyenne	55,0	9,0 kW	8,8 kW	Hors plage	190 L	Radiateurs Fonte	50 L		
034073	double service	déporté	eau/eau sonde verticale 120m	303 m	-11 °C	115 m²	4 440 W	Maison Individuelle	65,0	5,4 kW	5,5 kW	5,5 kW	200 mais est-il intégré ?	Plancher		40 L	200 L
035073	simple service	sans objet	eau/eau nappe 8m	306 m	-11 °C	133 m²	23 537 W	Maison Individuelle	60,0	18,3 kW	16,9 kW	Hors plage	sans objet	Radiateurs Fonte	300 L		
036049	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	31 m	-7 °C	133 m²	17 772 W	Maison Individuelle	55,0	12,0 kW	12,0 kW	12,0 kW	185 L	Radiateurs Fonte	100 L		
037049	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	78 m	-7 °C	159 m²	25 837 W	Maison Individuelle	60,0	14,5 kW	13,2 kW	11,9 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu			
038049	Simple service	sans objet	air/eau monobloc	63 m	-7 °C	71 m²	9 571 W	Maison Individuelle	65,0	10,3 kW	10,5 kW	10,6 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu	25 L		
039049	Double service	déporté	eau/eau (verticale 105	88 m	-7 °C	156 m²	3 054 W	Maison Individuelle	55,0	4,96 kW	4,65 kW	4,43 kW	sans objet	Batterie chaude sur soufflage	300 L		200 L
040049	Double service	intégré	eau/eau (corbeilles x6)	107 m	-7 °C	127 m²	5 406 W	Maison Mitoyenne	65,0	6,0 kW	5,8 kW	5,6 kW	200 ? Le ballon est il intégré ?	Plancher			
041065	Simple service	sans objet	air/eau monobloc	423 m	-7 °C	103 m²	8 955 W	Maison Individuelle	65 °C	12,0 kW	12,0 kW	12,0 kW	sans objet	Radiateurs Fonte	90 L		
042065	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	319 m	-6 °C	127 m²	8 746 W	Maison Individuelle	57 °C	16,0 kW	16,0 kW	12,0 kW	sans objet	Radiateurs Fonte	60 L		
043065	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	253 m	-6 °C	243 m²	14 404 W	Maison Individuelle	60,0	16,4 kW	15,4 kW	14,3 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu		30 L	
044065	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	603 m	-8 °C	135 m²	7 835 W	Maison Individuelle	60,0	12,1 kW	11,3 kW	9,5 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu			
045065	Simple service	sans objet	eau/eau sonde verticale 150m	176 m	-5 °C	155 m²	6 066 W	Maison Individuelle	65,0	7,6 kW	7,2 kW	6,8 kW	sans objet	Plancher			
046065	Double service	déporté	eau/eau sonde verticale 3 forages de 137	188 m	-5 °C	311 m²	16 033 W	Maison Individuelle	65,0	15,9 kW	15,4 kW	15,3 kW	sans objet	Plancher	200 L		300 L
047040	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	41 m	-5 °C	119 m²	11 954 W	Maison Individuelle	60,0	11,1 kW	10,2 kW	9,8 kW	220 L	Radiateurs Fonte			
048040	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	7 m	-4 °C	104 m²	3 665 W	Maison Individuelle	60,0	12,9 kW	12,0 kW	10,5 kW	200 L	Radiateurs Acier/Alu	100 L		
049040	simple service	sans objet	air/eau bi-bloc haute T	33 m	-4 °C	151 m²	10 560 W	Maison Individuelle	80,0	Hors plage	9,5 kW	9,6 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu	50 L		
050040	simple service	sans objet	air/eau monobloc	12 m	-4 °C	95 m²	9 665 W	Maison Individuelle	65 °C	12,0 kW	12,0 kW	12,0 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu	50 L		

Logt	Simple/double service	Ballon ECS déporté ou intégré ?	Type de PAC	ALTITUDE	Température de base	SHAB	P déperdition BE	Type d'habitation	T°C max production chauffage SANS appoint	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 35°C	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 45°C	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 55°C	Volume stockage ECS si intégré (L)	emetteurs	Volume bouteille chauffage	Volume ballon tampon chauffage	Volume ballon ECS si déporté
051015	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	1 080 m	-16 °C	102 m²	9 838 W	Maison Individuelle	55,0	11,0 kW	11,0 kW	10,0 kW	185 L	Radiateurs Acier/Alu	25 L		
052015	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	503 m	-11 °C	99 m²	5 587 W	Maison Individuelle	60,0	5,5 kW	5,2 kW	Hors plage	190 L	Plancher			
053015	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	615 m	-12 °C	109 m²	7 902 W	Maison Individuelle	55,0	8,4 kW	8,0 kW	Hors plage	sans objet	Radiateurs Fonte	90 L		
054015	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	725 m	-13 °C	134 m²	14 760 W	Maison Individuelle	56,0	12,8 kW	12,2 kW	11,4 kW	200 L	Radiateurs Acier/Alu	51 L		
055015	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	684 m	-12 °C	104 m²	7 480 W	Maison Individuelle	60,0	10,5 kW	9,2 kW	7,9 kW	sans objet	Radiateurs Fonte			
056029	Double service	Intégré	air/eau monobloc	156 m	-4 °C	147 m²	10 906 W	Maison Individuelle	60,0	12,4 kW	12,0 kW	11,4 kW	180 L	Radiateurs Acier/Alu		135 L	
057029	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	16 m	-4 °C	115 m²	12 484 W	Maison Individuelle	60,0	11,6 kW	10,9 kW	9,0 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu			
058029	Double service	Intégré	air/eau monobloc	18 m	-2 °C	209 m²	11 735 W	Maison Individuelle	70,0	11,5 kW	11,1 kW	11,2 kW	190 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu			
059029	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	12 m	-2 °C	145 m²	11 777 W	Maison Mitoyenne	60,0	8,5 kW	8,3 kW	7,9 kW	sans objet	Radiateurs Fonte et Acier/Alu		100 L	
060029	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	103 m	-4 °C	156 m²	8 058 W	Maison Individuelle	55,0	5,4 kW	4,7 kW	4,3 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu	50 L		
061083	Simple service	sans objet	air/eau monobloc	33 m	-4 °C	113 m²	8 858 W	Maison Individuelle	60,0	9,4 kW	9,3 kW	9,2 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu		130 L	
062083	Simple service	sans objet	air/eau monobloc	4 m	-4 °C	112 m²	12 242 W	Immeuble Collectif	75,0	13,7 kW	12,8 kW	11,6 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu	90 L		
063083	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	22 m	-4 °C	116 m²	13 195 W	Maison Mitoyenne	60,0	6,4 kW	5,7 kW	5,2 kW	220 L	Radiateurs Acier/Alu			
064083	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	42 m	-4 °C	105 m²	11 893 W	Maison Individuelle	55,0	6,0 kW	7,4 kW	7,3 kW	220 L	Radiateurs Acier/Alu			
065083	Double service	déporté	air/eau monobloc	108 m	-5 °C	211 m²	22 194 W	Maison Individuelle	70,0	13,1 kW	13,0 kW	12,9 kW	sans objet	Radiateurs Fonte et Acier/Alu			176 L
066057	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc haute T	155 m	-15 °C	208 m²	20 972 W	Maison Mitoyenne	80,0	11,2 kW	16,1 kW	15,5 kW	200 ou 270	Radiateurs Acier/Alu			
067057	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	162 m	-15 °C	172 m²	14 859 W	Maison Individuelle	60,0	9,6 kW	9,4 kW	9,2 kW	117 L	Radiateurs Acier/Alu			
068057	Double service	Intégré	air/eau monobloc	240 m	-15 °C	183 m²	11 283 W	Maison Mitoyenne	70,0	9,7 kW	9,4 kW	9,0 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu			
069057	Double service	Intégré	air/eau monobloc	222 m	-15 °C	94 m²	8 152 W	Maison Mitoyenne	70,0	8,9 kW	8,4 kW	8,3 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu			
070057	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	175 m	-15 °C	204 m²	11 571 W	Maison Mitoyenne	55,0	14,2 kW	14,0 kW	11,7 kW	200 L	Radiateurs Acier/Alu	85 L		
71084	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	93 m	-6 °C	141 m²	6 585 W	Maison Individuelle	60,0	14,9 kW	14,1 kW	12,4 kW	300 L	Radiateurs Acier/Alu	140 L		
72084	Double service	Intégré	eau/eau (nappe 3m)	27 m	-6 °C	140 m²	6 940 W	Maison Individuelle	65,0	5,8 kW	5,5 kW	5,2 kW	220 L	Plancher		200 L	
73084	Double service	déporté	eau/eau (nappe 30m)	183 m	-6 °C	408 m²	33 645 W	Maison Individuelle	65,0	15,9 kW	15,4 kW	15,3 kW	sans objet	Plancher et radiateurs fonte			500 L
74084	Double service	Intégré	air/eau monobloc	30 m	-6 °C	168 m²	17 534 W	Maison Individuelle	70,0	12,0 kW	12,2 kW	12,6 kW	230 L	Radiateurs Fonte			
75084	Double service	Intégré	air/eau bi-bloc	34 m	-6 °C	122 m²	10 327 W	Maison Individuelle	55,0	12,0 kW	12,0 kW	12,0 kW	185 L	Ventilo-convecteur	48 L		

Logt	Simple/double service	Ballon ECS déporté ou intégré ?	Type de PAC	ALTITUDE	Température de base	SHAB	P déperdition BE	Type d'habitation	T°C max production chauffage SANS appoint	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 35°C	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 45°C	Puissance thermique (sans appoint) à Tbase (ou 0°C PAC EE) / 55°C	Volume stockage ECS si intégré (L)	emetteurs	Volume bouteille chauffage	Volume ballon tampon chauffage	Volume ballon ECS si déporté
076050	Double service	intégré	air/eau monobloc	92 m	-2 °C	142 m²	8 487 W	Maison Individuelle	62,0	8,5 kW	7,8 kW	7,1 kW	190 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu	60 L		
077050	Double service	intégré	air/eau monobloc	25 m	-2 °C	116 m²	11 456 W	Maison Individuelle	62,0	8,5 kW	7,8 kW	7,1 kW	190 L	Radiateurs Fonte	40 L		
078050	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	29 m	-2 °C	72 m²	7 187 W	Maison Mitoyenne	60,0	5,5 kW	5,4 kW	5,4 kW	220 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu		40 L	
079050	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	25 m	-2 °C	99 m²	4 438 W	Maison Mitoyenne	60,0	5,5 kW	5,2 kW	Hors plage	sans objet	Radiateurs Acier/Alu		51 L	
080050	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	83 m	-2 °C	229 m²	5 285 W	Maison Mitoyenne	60,0	6,8 kW	6,6 kW	6,7 kW	220 L	Plancher	100 L		
081059	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	24 m	-9 °C	85 m²	11 978 W	Maison Mitoyenne	60,0	10,7 kW	10,1 kW	7,7 kW	sans objet	Radiateurs Fonte et Acier/Alu			
082059	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	133 m	-9 °C	262 m²	14 759 W	Maison Individuelle	60,0	11,7 kW	11,0 kW	9,9 kW	-	Radiateurs Fonte et Acier/Alu	300 L		
083059	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	133 m	-9 °C	130 m²	5 950 W	Maison Individuelle	55,0	11,6 kW	10,7 kW	9,6 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu	140 L		
084059	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	232 m	-10 °C	142 m²	11 759 W	Maison Individuelle	60,0	11,2 kW	9,5 kW	8,0 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu			
085059	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	63 m	-9 °C	166 m²	9 836 W	Maison Individuelle	60,0	9,9 kW	9,7 kW	9,2 kW	sans objet	Plancher et radiateurs Acier/Alu	<10-15	80 L	
086034	Double service	intégré	air/eau bi-bloc haute T	6 m	-5 °C	174 m²	25 258 W	Maison Mitoyenne	80,0	Hors plage	12,5 kW	12,6 kW	200 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu		29 L	
087034	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	9 m	-5 °C	173 m²	11 690 W	Maison Individuelle	55,0	11,5 kW	12,1 kW	10,6 kW	200 L	Plancher			
088034	Double service	intégré	air/eau monobloc	500 m	-7 °C	241 m²	11 173 W	Maison Individuelle	70,0	12,4 kW	12,2 kW	11,8 kW	190 L	Radiateurs Fonte et Acier/Alu			
89034	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	65 m	-5 °C	220 m²	14 081 W	Maison Individuelle	60,0	10,8 kW	10,5 kW	9,8 kW	177 L	Plancher		25 L	
090034	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	116 m	-5 °C	154 m²	8 541 W	Maison Individuelle	60,0	12,4 kW	12,0 kW	11,6 kW	200 L	Radiateurs Acier/Alu	51 L		
091052	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	320 m	-13 °C	91 m²	6 099 W	Maison Individuelle	60,0	5,5 kW	5,2 kW	Hors plage	sans objet	Radiateurs Fonte			
092052	Double service	intégré	air/eau bi-bloc haute T	366 m	-13 °C	195 m²	7 827 W	Maison Mitoyenne	80,0	11,6 kW	16,1 kW	15,6 kW	270 L	Radiateurs Acier/Alu	105 L		
093052	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	180 m	-12 °C	216 m²	8 414 W	Maison Mitoyenne	60,0	9,6 kW	9,8 kW	9,3 kW	220 L	Plancher		60 L	
094052	Double service	intégré	air/eau monobloc	373 m	-13 °C	140 m²	11 728 W	Maison Mitoyenne	70,0	9,5 kW	9,0 kW	8,9 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu			
095052	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc haute T	344 m	-13 °C	97 m²	5 922 W	Maison Individuelle	80,0	Hors plage	9,7 kW	9,8 kW	sans objet	Radiateurs Fonte		56 L	
096016	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	119 m	-5 °C	219 m²	9 654 W	Maison Individuelle	60,0	13,4 kW	12,9 kW	12,4 kW	-	Plancher et radiateurs Acier/Alu	50 L		
097016	Double service	intégré	air/eau bi-bloc	112 m	-5 °C	96 m²	9 152 W	Maison Individuelle	60,0	8,6 kW	8,4 kW	7,9 kW	190 L	Radiateurs Acier/Alu			
098016	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	54 m	-5 °C	97 m²	9 625 W	Maison Individuelle	60,0	5,7 kW	5,6 kW	5,4 kW	sans objet	Radiateurs Fonte	130 L		
099016	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	174 m	-5 °C	101 m²	7 343 W	Maison Individuelle	65 °C	9,0 kW	9,0 kW	12,0 kW	sans objet	Radiateurs Acier/Alu			
100016	Simple service	sans objet	air/eau bi-bloc	81 m	-5 °C	150 m²	14 522 W	Maison Individuelle	55,0	9,0 kW	9,0 kW	9,0 kW	sans objet	Radiateurs Fonte	80 L		

4.2. Courrier postal d'invitation



Vos contacts :

Téléphone : 06 75 34 71 60

Courriel : pac@enertech.fr

Paris, le 13/06/2023

Objet : Lancement d'une étude nationale sur les pompes à chaleur (Performances Pompes à Chaleur)

Madame, Monsieur,

Vous avez bénéficié du dispositif financier « **Coup de pouce Pompe à chaleur** » pour vous accompagner dans l'installation de votre pompe à chaleur.

Le **Ministère de la Transition Ecologique** et l'agence de la transition écologique (**ADEME**) souhaitent aujourd'hui analyser les performances réelles de ces équipements sur le terrain (consommation, confort, satisfaction). Le bureau d'étude Enertech (www.enertech.fr) a été missionné pour réaliser cette étude auprès d'un échantillon de personnes sélectionnées aléatoirement. **Vous faites partie de cette première sélection.**

Cette étude ne présente pas de caractère obligatoire. Nous avons néanmoins besoin d'un maximum de réponses positives pour assurer la qualité statistique des résultats. Votre participation est donc importante et nous vous remercions par avance de votre engagement.

Dans le cadre de ce projet, vos consommations d'énergie seront analysées pendant un an à l'aide d'une instrumentation in-situ posée par les techniciens d'Enertech. Les données seront stockées de manière anonyme pour être analysées au terme de la période de mesures. En remerciement, vous recevrez un diagnostic détaillé des performances de votre pompe à chaleur (consommation d'électricité) ainsi qu'un bon cadeau de 50€.

Cette étude sera pour vous l'occasion de faire gratuitement le point sur le fonctionnement de votre pompe à chaleur et pour l'Etat de bénéficier de retours de terrain sur les dispositifs d'accompagnement mis en place.

Pour participer à l'étude :

Il vous suffit de répondre au questionnaire accessible en ligne (lien ci-dessous). Il faut compter moins de 5 minutes pour le remplir. Pour ce faire, vous devez vous connecter à l'adresse suivante ou scanner le QR code :

<http://pac.enertech.fr>



En vous remerciant par avance de votre participation, nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de notre considération distinguée.

José CAIRE, directeur villes et territoires durables, ADEME

4.3. Courrier électronique de relance

De : PAC Energesth pac@energesth.fr
Envoyé : lundi 28 août 2023 20:29
À : ac@energesth.fr
Objet : Lancement d'une étude nationale sur les pompes à chaleur (Performances Pompes à Chaleur) - relance



Madame, Monsieur,

Vous avez bénéficié du dispositif financier « Coup de pouce Pompe à chaleur » pour vous accompagner dans l'installation de votre pompe à chaleur.

Vous (ou une personne de votre foyer) avez reçu il y a quelques jours un courrier au sujet de l'étude nationale sur les pompes à chaleur (Performances Pompes à Chaleur).

Le Ministère de la Transition Écologique et l'Agence de la transition écologique (ADEME) souhaitent aujourd'hui analyser les performances réelles de ces équipements sur le terrain (consommation, confort, satisfaction). Le bureau d'étude Energesth (energesth.fr) a été missionné pour réaliser cette étude auprès d'un échantillon de personnes sélectionnées aléatoirement.

Nous avons le plaisir de vous annoncer que vous faites partie de cette première sélection.

Dans le cadre de ce projet, vos consommations d'énergie seront analysées pendant un an à l'aide d'une instrumentation in-situ posée par les techniciens d'Energesth. Les données seront stockées de manière anonyme pour être analysées au terme de la période de mesures. En remerciement, vous recevrez un diagnostic détaillé des performances de votre pompe à chaleur (consommation d'électricité) ainsi qu'un bon cadeau de 50€. Cette étude sera pour vous l'occasion de faire gratuitement le point sur le fonctionnement de votre pompe à chaleur et pour l'éventuel de bénéficier de retours de terrain sur les dispositifs d'accompagnement mis en place.

Cette étude ne présente pas de caractère obligatoire. Nous avons néanmoins besoin d'un maximum de réponses positives pour assurer la qualité statistique des résultats. Votre participation est donc importante et nous vous remercions par avance de votre engagement.

Pour participer à l'étude :

Il vous suffit de répondre au questionnaire accessible en ligne (lien ci-dessous). Il faut compter moins de 5 minutes pour le remplir. Pour ce faire, vous devez cliquer sur le lien suivant ou scanner le QR code :

**RÉPONDRE AU
QUESTIONNAIRE**



Si votre logement est éligible, vous serez recontactés dans les semaines à venir pour vous présenter les modalités du projet.

Si vous avez des à présent des questions, vous pouvez joindre Edouard PÉCLET par téléphone au 05 25 03 35 18 ou encore par mail à l'adresse ac@energesth.fr

En vous remerciant par avance de votre participation, nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de notre considération distinguée.

Muriel DUPRET
pour l'équipe Performances Pompes à Chaleur

4.4. Questionnaire en ligne de manifestation d'intérêt



Ce questionnaire vous est posé pour valider l'éligibilité de votre logement à l'étude nationale "Performances Pompes à Chaleur" qui vise à analyser les performances réelles des pompes à chaleur sur le terrain (consommation, confort, satisfaction).

Dans le cadre de ce projet, vos consommations d'énergie seront analysées pendant un an à l'aide d'une instrumentation in-situ posée par les techniciens d'Enertech (www.enertech.fr)

Dans ce questionnaire, les champs obligatoires sont signalés par une étoile ().*

1. Adresse mail *

Saisissez votre texte ici

Dans cette première partie, nous allons vous poser des questions pour vérifier si votre profil correspond à celui que nous recherchons.

2. Êtes-vous propriétaire de votre logement et s'agit-il de votre habitation principale ? *

- ☐ Il s'agit de ma résidence principale, et j'en suis propriétaire
- ☐ Il s'agit de ma résidence principale, mais je n'en suis pas propriétaire
- ☐ Il s'agit de ma résidence principale, mais je l'occupe moins de 10 mois par an
- ☐ Ce n'est pas ma résidence principale

3. Avez-vous l'intention de déménager dans les 2 ans à venir ? *

- ☐ Oui
- ☐ Non
- ☐ Ne se prononce pas

4. La pompe à chaleur est-elle votre système de chauffage principal ? *

- ☐ Oui
- ☐ Non

5. **Quel type de pompe à chaleur possédez-vous ? ***

- ☐ **Air/eau** (bloc extérieur avec ventilateur ET radiateurs ou plancher chauffant)
- ☐ **Air/Air** (bloc extérieur avec ventilateur ET chauffage intérieur par air)
- ☐ **Eau/Eau** (forage ou géothermie...)
- ☐ **Je ne sais pas**
- ☐ Autre (préciser)

Saisissez votre texte ici

6. **Utilisez-vous votre pompe à chaleur pour faire de la climatisation ou du rafraîchissement en été ?**

- ☐ Oui
- ☐ Non

7. **Avez-vous un autre système de chauffage dans votre logement ? ***

- ☐ Oui
- ☐ Non

8. Quel est cet autre système de chauffage ?

Plusieurs réponses possibles

- ☐ Radiateurs électriques dans une partie du logement
- ☐ Sèche-serviette électrique dans la salle de bain
- ☐ Chaudière (gaz, fioul, bois)
- ☐ Poêle ou cheminée
- ☐ Climatiseur split réversible
- ☐ Autres (préciser) :

Saisissez votre texte ici

9. Comment est produite l'eau chaude de votre logement (douche...) ?

- ☐ Par votre pompe à chaleur de chauffage
- ☐ Par une chaudière
- ☐ Par un chauffe-eau électrique (cumulus)
- ☐ Par un chauffe-eau thermodynamique individuel
- ☐ Par un chauffe-eau solaire
- ☐ Je ne sais pas
- ☐ Autres (préciser)

Saisissez votre texte ici

10. **Est-ce que votre installation de chauffage est commune avec un autre local de type chambre d'hôte, gîte, logement indépendant...**

- ☐ Oui
- ☐ Non

11. **Possédez-vous les factures d'énergie avant l'installation de la pompe à chaleur ?**

- ☐ Oui
- ☐ Non

Si vous acceptez de participer, pouvez-vous nous communiquer les informations suivantes ?

Informations qui seront transmises à la société ENERTECH (www.enertech.fr), coordinatrice de l'étude, pour qu'elle puisse vous recontacter

12. **Nom ***

13. Prénom

Saisissez votre texte ici

14. Adresse

Saisissez votre texte ici

15. Code postal

Saisissez un nombre



16. Ville *

Saisissez votre texte ici

17. Numéro de téléphone sur lequel vous êtes joignable *

Saisissez votre texte ici

18. Avez-vous une question, un commentaire ?

Saisissez votre texte ici

Valider

4.5. Questionnaire rempli avec l'occupant durant l'instrumentation

1 Généralités

Numéro du logement
Nom
Ville

2 Occupation

Tranche
Nb
% présent

0- 10ans	11-17 ans	18-24 ans	25-59 ans	60 -74 ans	>74 ans

3 Abonnement élec

Mono-Tri
Type compteur
Abonnement kVA
HP/HC
Installation photovoltaïque en autoconso ? (si oui
détails = Puissance crête, orientation, photo si
possible)

4 Avant travaux

Type de chauffage avant travaux
Factures énergie avant travaux

5 Installation PAC

Date installation
Entreprise
Montant aides
Montant travaux
Qui a dimensionné P PAC ?
Choix ECS ou non : qui ?
Abonnement élec réhaussé ?
Avez-vous souscrit à un contrat de maintenance ?

6 Utilisation PAC

Y a-t-il un thermostat dans la maison pour piloter le
chauffage ?
Quel réglage ou paramétrage touchez-vous pour le
chauff ?
Quel réglage ou paramétrage touchez-vous pour l'ECS
?
PAC connectée : votre PAC est-elle connectée ?
Connectable ? Utilisez vous cette fonction ? Si oui
comment ? Ders données sont -elles remontées chez
le fabricant à votre connaissance ?

7 Satisfaction générale

Satisfaction déroulé des travaux ?
Satisfaction fonctionnement PAC ?
Dysfonctionnements constatés ?

8 Appoint bois ou autre

Si granulé photo sac + calendrier
Si bois bûche photo tas + garder les factures
Autre appoint de chaleur (élec, gaz ...?)

9 Emetteurs de chaleur (prendre photos)

Emetteur 1
Emetteur 2
Emetteur 3
Emetteur 4
Emetteur 5
Emetteur 6
Emetteur 7
Emetteur 8
Emetteur 9
Bouteille découplage (indiquer le volume)
Ballon tampon (indiquer le volume)
Photo + position thermostat PAC

Pièce	Type	Dimension Largeur	Hauteur	Profondeur	Régule term

4.6. Formulaire RGPD



Financé par



Recueil de consentements pour la collecte et la communication de données à caractère personnel

PROJET « Performances Pompes à Chaleur »

Ce document est destiné à recueillir le consentement des personnes pour l'utilisation de leurs données de contacts, de consommation de chaleur, électriques et de température dans le cadre du projet « Campagne de mesures sur les pompes à chaleur en résidentiel individuel ». Il indique les objectifs et les finalités du projet.

Objectif du Projet

La pompe à chaleur (PAC) est un des outils centraux de la décarbonation du chauffage, et en tant que tel il est actuellement soutenu par les politiques publiques et dispositifs financés par des fonds privés. Avec succès, puisqu'en 2021 ce sont 84 000 gestes de mise en œuvre de pompes à chaleur qui ont été réalisés dans le cadre de MaPrimeRénov'.

Le projet « Performances Pompes à Chaleur » est mené par l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Il vise à mesurer le niveau de performance atteint avec les pompes à chaleur en fonction de différents paramètres tels que les régimes de température de la source froide (l'air, le sol, l'eau) et de l'émission de chaleur (radiateur, plancher chauffant etc.).

Désignation du responsable de traitement

La demande de consentement de traitement des données de consommation électrique est portée par l'ADEME. L'ADEME est responsable du traitement. Enertech est « sous-traitant » du traitement des « données à caractère personnel » lié par un contrat en cohérence avec l'article 28 du RGPD.

La société Enertech, en qualité de « sous-traitant » en charge de la collecte et du traitement des données, assurera la confidentialité et la sécurité des données. Les données de mesure de consommation d'énergie seront pseudonymisées, c'est-à-dire qu'aucun élément de désignation directe de l'utilisateur ne sera directement accessible.

Destinataires des données

Les responsables de traitement conjoints et leurs sous-traitants, liés aux responsables de traitement par un contrat en cohérence avec la législation : Muriel DUPRET, Ingénieur Conseil, 305 chemin des Fontaines, 26160 Salettes (SIREN : 833 129 539) ; Uwe Bramkamp, Ingénieur Conseil, 21 rue Jean Mermoz F - 44470 Carquefou (SIREN 888 395 787)

Catégories de données collectées

Elles sont constituées de quatre types de données :

- les données désignant l'utilisateur, utilisées par Enertech pour entrer en contact avec les participants du projet et autoriser Enedis à donner accès à leurs données Linky (nom, prénom, adresse, numéro de téléphone, adresse mail).
- Les données propres à l'utilisateur, utilisées pour l'analyse des consommations d'énergie (type de logement, surface du logement, composition du foyer, niveau de revenu, statut -propriétaire/locataire, description des équipements du logement).
- Les mesures relevées toutes les 10 minutes, issues des capteurs installés chez l'utilisateur (énergie, température et humidité).
- Les courbes de charge au pas de temps de 30 minutes, issues des compteurs Linky, pour pouvoir transposer ces études à la population générale.

ENERTECH SCOP - Siège social : 65, Les Balcons de l'Amourier - 26160 Pont-de-Barret - Siret 41322792500021
Scop Arl à capital variable - RCS B 413 227 925 - APE 7112 B - I# TVA intracommunautaire FR 87415227925
www.enertech.fr

Finalités des traitements

Les traitements des données recueillies par la société Enertech pour le compte de l'ADEME ont pour seule finalité la recherche scientifique, au sens de l'article 89-1 du RGPD, sur les usages domestiques de l'électricité.

Période de validité du consentement

Le consentement au traitement des données collectées est valable pour la durée d'adhésion au projet c'est-à-dire depuis l'installation des capteurs jusqu'à leur retrait ou jusqu'à la décision de l'utilisateur de se retirer de l'étude. Il est révoquant par courrier électronique à l'adresse pac@enertech.fr.

De même, l'accès aux données Linky est limité à la durée d'adhésion au projet et peut être révoqué à tout moment.

Durée de conservation des données personnelles

Les données désignant l'utilisateur (nom, prénom, adresse, numéro de téléphone, adresse mail) seront conservées 3 ans après la fin de projet afin de pouvoir entrer en contact pour d'éventuelles questions sur le foyer et ses équipements. Elles seront ensuite détruites.

Les données propres à l'utilisateur et les mesures de consommation seront quant à elles conservées 10 ans après la fin de projet.

Droit d'accès et de rectification

Vous pouvez accéder aux données vous concernant, les rectifier, demander leur effacement ou exercer votre droit à la limitation du traitement de vos données. Pour exercer ces droits ou pour toute question sur le traitement de vos données dans ce dispositif, vous pouvez contacter :

Par voie postale :

ENERTECH
M. Thierry Rieser
65 les Balcons de l'Amourier
26160 Pont-de-Barret
France
pac@enertech.fr

Consultez le site cnil.fr pour plus d'informations sur vos droits. Si vous estimez que vos droits « Informatique et Libertés » ne sont pas respectés, vous pouvez adresser une réclamation à la CNIL.

Désignation de l'utilisateur et consentements accordés

Nom, prénom :

Résidant à l'adresse :

- ☐ en cochant la case, je donne mon consentement pour la collecte des courbes de charge au pas 30 minutes issues de mon compteur Linky ;
- ☐ en cochant la case, je donne mon consentement pour le partage et le traitement des courbes de charge issues de mon compteur Linky avec l'ensemble des partenaires du projet (Ademe et leurs sous-traitants) en reprenant l'historique sur une profondeur de 24 mois ;
- ☐ en cochant la case, je donne mon consentement pour la collecte, l'accès et le traitement des données de mesures relevées toutes les 10 minutes, issues des capteurs installés chez moi.

Date :

Signature

ENERTECH SCOP - Siège social : 65, Les Balcons de l'Amourier - 26160 Pont-de-Barret - Siret 41522792500021
Scop ARL à capital variable - RCS B 415 227 925 - APE 7112 B - 1^{er} TVA intracommunautaire FR 87415227925
www.enertech.fr

4.7. Formulaire Linky

AUTORISATION DE COMMUNICATION À UN TIERS
DES DONNÉES D'UN OU PLUSIEURS SITES DE CONSOMMATION RACCORDÉS AU RÉSEAU PUBLIC DE DISTRIBUTION

A. CLIENT (particulier) - Ne remplir que le cadre A ou B

M. ☐ Mme ☐ Nom : _____ Prénom : _____
 Né(e) le : ____/____/____ à : _____
 Adresse : _____
 Code postal : ____ Commune : _____ E-mail : _____
 N° téléphone : _____

B. CLIENT (professionnel ou autre) - Ne remplir que le cadre A ou B

Entreprise ☐ Collectivité locale (commune, département, ...) ☐ EPCI (syndicat de gestion...) ☐ Association, copropriété... ☐
 Dénomination sociale : _____ Forme juridique (SA, SARL, ...): _____
 Nom commercial : _____
 N° d'identification (SIRET) : _____ Activité (code NAF) : ____/____/____
 Adresse : _____
 Code postal : ____ Commune : _____
 Représenté par (signataire du présent document) :
 M. ☐ Mme ☐ Nom : _____ Prénom : _____
 Nom : _____
 Prénom : _____
 Adresse professionnelle : _____
 N° téléphone : _____ E-mail : _____

Le signataire du présent formulaire déclare être dûment habilité par le client pour la signature du présent document.

C. TIERS (particulier) - Ne remplir que le cadre C ou D

M. ☐ Mme ☐ Nom : _____ Prénom : _____
 Né(e) le : ____/____/____ à : _____
 Adresse : _____
 Code postal : ____ Commune : _____ E-mail : _____
 N° téléphone : _____

D. TIERS (professionnel ou autre) - Ne remplir que le cadre C ou D

Entreprise ☒ Collectivité locale (commune, département, ...) ☐ EPCI (syndicat de gestion...) ☐ Association, copropriété... ☐
 Dénomination sociale : Enertech SCOP Forme juridique (SA, SARL, ...): Scoop ARL
 Nom commercial : _____
 N° d'identification (SIRET) : 415227925000211 Activité (code NAF) : 7112 B
 Adresse : 65 les balcons de l'Amourier
 Code postal : 20110 Commune : Pont-de-Barret
 Représenté par :
 M. ☒ Mme ☐
 Nom : Rieser
 Prénom : Thierry
 Adresse professionnelle : 65 les balcons de l'Amourier - 20160 Pont-de-Barret
 N° téléphone : 04 75 90 18 54 E-mail : pac@enertech.fr

Par la signature de ce document, le Client autorise expressément le Tiers à demander et à recevoir communication auprès d'Enedis, SA à direction et conseil de surveillance, au capital de 270 037 000 euros, immatriculée au R.C.S. de Nanterre sous le numéro 444 608 442 et dont le siège social est situé Tour Enedis, 34 Place des Corolles, 92070 Paris La Défense Cedex des données cochées ci-dessous, sous réserve de disponibilité :

☒ L'historique des consommations, en kWh, du site (et puissances atteintes et dépassements de puissance) ;
☒ L'historique des relevés d'index quotidiens, en kWh, et la puissance maximale quotidienne, en kVA ou kWh, du site ;
☒ L'historique de courbe de charge du site¹⁶ ;
☒ Les données techniques et contractuelles disponibles du site¹⁷ .

Usage des données (conseil énergétique, études, ...) : Performances Pompes à Chaleur

La présente autorisation ne peut être cédée. Elle est consentie pour une durée de 24 mois à compter de la date de signature (1 mois en l'absence de mention). Elle ne peut excéder 12 mois.

Le Client accepte expressément que ses données personnelles soient conservées par le Tiers et/ou Enedis à des fins de gestion et de traçabilité. Conformément à la loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978, le Client dispose d'un droit d'accès, de rectification, de suppression et d'opposition pour motifs légitimes sur l'ensemble des données le concernant qu'il peut exercer sur simple demande auprès du Tiers et/ou d'Enedis, 34 place des Corolles, 92079 Paris La Défense Cedex.

Date	Signature du Client + cachet le cas échéant
Fait à : _____	

^(a) Ensemble de valeurs moyennes horodaires de la puissance active ou réactive injectée ou soutirée, sur des périodes d'intégration consécutives et de même durée.

¹⁷ Caractéristiques du raccordement, du dispositif de comptage et informations relatives au contrat de fourniture connus d'Enedis (puissance souscrite, option tarifaire d'acheminement, etc.)

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Principe de recrutement de l'échantillon.....	12
Tableau 2 : Répartition géographique des 10 PAC eau/eau recrutées	15
Tableau 3 : Processus de recrutement utilisé pour constituer l'échantillon	15
Tableau 4 : Planning de recrutement et d'instrumentation qui a été suivi	16
Tableau 5 : Set de mesureurs prévu au stade de la conception du projet pour le suivi des grandeurs exigées dans le cahier des charges.....	19
Tableau 6 : Liste et quantitatif des capteurs déployés dans les 100 logements.....	25
Tableau 7 : Répartition des sites instrumentés par zone climatique et altitude. Indication des températures de base	27
Tableau 8 : Caractéristiques de l'abonnement électrique des logements.....	28
Tableau 9 : Evolution de la puissance souscrite avant/après l'installation de la PAC	29
Tableau 10 : Liste des principales erreurs détectées dans les audits enveloppes sous-traités.....	31
Tableau 11 : Configurations hydrauliques rencontrées.	46
Tableau 12 : Liste de problèmes rencontrés sur certaines installations de l'échantillon	49
Tableau 13 : Caractère « connectable » des PAC de l'échantillon.....	56
Tableau 14 : Distribution des fabricants de l'échantillon par type de zone climatique	57
Tableau 15 : Résultat de l'étude sur le dimensionnement des PAC de l'échantillon par rapport à la déperdition des logements	70
Tableau 16 : Détail des coûts pour 4 PAC eau/eau.	74
Tableau 17 : Consommations d'électricité et production de froid mesurés pour la climatisation et le rafraîchissement, étés 2024 et 2025.....	150
Tableau 18 : Présentation des hypothèses du calcul de temps de retour sur investissement.....	155

FIGURES

Figure 1 : Températures de base réglementaires.....	12
Figure 2 : Carte météorologique de la France avec la pluviométrie moyenne annuelle	13
Figure 3 : Carte française des zones climatiques définies dans le cadre de la RT2012	13
Figure 4 : Zones géographiques sélectionnées dans le cadre du projet.	14
Figure 5 : Principe de suivi électrique des PAC et de pose des compteurs de chaleur.	17
Figure 6 : Illustration de l'intégration dans un logement du set de mesureurs proposé.....	20
Figure 7 : Exemples de poses des capteurs de consommation électrique	22
Figure 8 : Exemples de poses de compteurs de chaleur	24
Figure 9 : Exemples de poses de sondes d'ambiances	24
Figure 10 : Exemple de pose de stations météo	25
Figure 11 : Localisation géographique des 100 PAC instrumentées dans le cadre du projet (en rose les PAC air/eau ; en bleu les PAC eau/eau)	26
Figure 12 : Exemple d'identification d'un logement	27
Figure 13 : Composition des foyers de l'échantillon.....	28
Figure 14 : Erreurs principales détectées dans les audits enveloppe sous-traités	31
Figure 15 : Typologie des logements instrumentés	33
Figure 16 : Graphique de la répartition des surfaces habitables des logements de l'échantillon	33
Figure 17 : Année de construction des logements de l'échantillon	34
Figure 18 : Type de ventilation des logements de l'échantillon.....	35
Figure 19 : Infiltrations : n50 des logements de l'échantillon estimés par les audits	35
Figure 20 : Débits de ventilation et d'infiltration dans les logements, rapportés à leur surface habitable (selon les audits réalisés)	36
Figure 21 : Déperdition des logements de l'échantillon, rapportée à leur surface habitable et à 1°C d'écart de température intérieur/extérieur	37
Figure 22 : Déperdition totale des logements (classement conservé avec le graphique précédent).....	38
Figure 23 : Répartition relative des déperditions en fonction du niveau d'isolation.....	39
Figure 24 : Niveau de déperdition relative en fonction de la période de construction	39
Figure 25 : Coefficients de transmission thermique des parois rencontrées dans l'échantillon	40
Figure 26 : Proportions des niveaux d'isolation des différentes parois des logements de l'échantillon	41

Figure 27 : Répartition de la température maximale de production sans appoint des PAC air/eau	42
Figure 28 : Localisation géographique des 10 PAC eau/eau instrumentées et indication des types de géothermie	43
Figure 29 : Répartition de la température maximale de production sans appoint des PAC eau/eau	44
Figure 30 : Description des fluides frigorigènes utilisés par les PAC de l'échantillon	45
Figure 31 : Illustration de 3 configurations hydrauliques (B, J et R en monobloc)	46
Figure 32 : Illustration des écueils observés sur le positionnement de l'unité extérieure.....	50
Figure 33 : Exemples de caches vendus par les grandes enseignes de bricolage pour camoufler les unités extérieures	50
Figure 34 : Les bonnes pratiques à respecter pour le positionnement de l'unité extérieure.....	51
Figure 35 : Illustration de différents niveaux de calorifugeage des installation (à gauche non calorifugé, à droite bien calorifugé).....	51
Figure 36 : Description des émetteurs de chaleur dans les logements de l'échantillon	52
Figure 37 : Types d'émetteurs rencontrés pour les PAC « standards » (< 65°C).....	53
Figure 38 : Types d'émetteurs rencontrés pour les PAC haute température (70 > T°C ≥ 65) et très haute température (≥ 70)	53
Figure 39 : Mode de production de l'ECS dans les logements de l'échantillon	55
Figure 40 : Part des PAC connectables avec remontées d'informations et pilotage possible par l'utilisateur	56
Figure 41 : Répartition des différents fabricants des PAC instrumentées.....	57
Figure 42 : Modes de chauffage d'appoint rencontrés dans les logements de l'échantillon	58
Figure 43 : Part des PAC air/eau instrumentées pouvant faire du rafraîchissement.....	59
Figure 44 : Part des PAC eau/eau instrumentées pouvant faire du rafraîchissement.....	59
Figure 45 : Localisation géographique des 14 PAC pouvant être utilisées pour climatiser/rafraîchir	60
Figure 46 : Puissance acoustique des unités extérieures des PAC air/eau de l'échantillon	61
Figure 47 : Puissance acoustique des unités extérieures des PAC air/eau à "medium température" et conditions extérieures moyennes en fonction de la puissance thermique au régime -7/55°C.....	61
Figure 48 : Coefficient de performance de chauffage saisonnier (SCOP NF EN 14822, conditions climatiques A) des PAC de l'échantillon	62
Figure 49 : SCOP à basse température pour les PAC air/eau "standard" et "haute et très haute température"	63
Figure 50 : SCOP à moyenne température pour les PAC air/eau "standard" et "haute et très haute température"	64
Figure 51 : SCOP aux conditions climatiques moyennes, application basse température (W35) en fonction de la puissance thermique -7/35	65
Figure 52 : SCOP aux conditions climatiques moyennes, application basse température (W55) en fonction de la puissance thermique -7/55	65
Figure 53 : Mode de chauffage principal avant installation des PAC de l'échantillon	66
Figure 54 : Année de pose des PAC de l'échantillon	67
Figure 55 : Puissance thermique des PAC air/eau de l'échantillon à différents points de fonctionnement en kW et en W/m ²	68
Figure 56 : Puissance thermique des PAC eau/eau de l'échantillon à différents points de fonctionnement en kW et W/m ²	69
Figure 57 : Facteur de dimensionnement des pompes à chaleur de l'échantillon (rapport entre la puissance de la PAC installée et la déperdition relevée sur le logement)	71
Figure 58 : Puissance thermique des PAC de l'échantillon, absolue et rapportée à la surface habitable. NB : l'ordre des logements est le même que sur le graphique précédent pour pouvoir faire le lien avec le facteur de dimensionnement.	72
Figure 59 : Coût total des travaux liés à l'installation des PAC air/eau de l'échantillon	73
Figure 60 : Reste à charge des ménages dans l'installation de leur PAC air/eau.....	74
Figure 61 : Part des aides dans le coût des travaux (même ordre de logements que le graphique précédent).....	75
Figure 62 : Origine des aides perçues sur l'installation des PAC air/eau.....	76
Figure 63 : Parts de la main d'œuvre, de la fourniture et de la dépose de la chaudière existante dans le coût des travaux d'installation des PAC air/eau	77
Figure 64 : Coût affiché dans les factures/devis pour la fourniture des PAC air/eau	77
Figure 65 : Etat des lieux des souscriptions d'un contrat de maintenance annuel par les participants	79
Figure 66 : Satisfaction des occupants de l'échantillon concernant le fonctionnement de leur PAC.....	80
Figure 67 : Présentation des périodes de mesure étudiées pour chaque logement.....	81
Figure 68 : Indice de rigueur hivernal en France Métropolitaine depuis 1990, en DJU base 15 et DJU base 17.....	82

Figure 69 : Données "brutes" du logement 054015 le 06/03/2024 pour illustration de la méthode de traitement. Les résistances d'appoint sont séparées de la consommation électrique de la PAC lors du pré-processing des données.	83
Figure 70 : Identification des différentes périodes mesurées	84
Figure 71 : SCOP Carnot et facteur de Carnot mesurés dans les logements de l'échantillon (toutes les PAC, hors points « hors norme »)	85
Figure 72 : SCOP mesuré sur chaque installation	86
Figure 73 : COP saisonnier (SCOP) chauffage mesuré sur les PAC air/eau	87
Figure 74 : COP saisonnier (SCOP) chauffage mesuré sur les PAC eau/eau	88
Figure 75 : Comparaison entre le SCOP chauffage théorique donné par le fabricant et le SCOP mesuré	89
Figure 76 : COP saisonnier de chauffage sur chaque installation et facteur d'efficacité par rapport à Carnot	90
Figure 77 : COP saisonnier de Carnot (SCOP Carnot) chauffage mesuré sur les PAC air/eau	91
Figure 78 : Efficacité par rapport à Carnot des PAC air/eau	92
Figure 79 : Comparaison des SCOP chauffage mesurés entre les PAC simple et double service, avec et sans prise en compte des auxiliaires et veilles	92
Figure 80 : COP saisonnier de Carnot (SCOP Carnot) chauffage mesuré sur les PAC eau/eau	93
Figure 81 : Efficacité par rapport à Carnot des PAC eau/eau	94
Figure 82 : Températures de production de chauffage de chaque logement, triées par moyenne croissante et par type d'émetteur	95
Figure 83 : Illustration de l'interprétation de la loi d'eau en cas de cyclage important	96
Figure 84 : Part des PAC de l'échantillon pilotant la température de départ chauffage avec une compensation de la consigne sur la température d'ambiance	97
Figure 85 : Loi d'eau et déperditions	98
Figure 86 : Illustration de quelques lois d'eau	98
Figure 87 : Température de production du chauffage en fonction de la déperdition surfacique	99
Figure 88 : Températures moyennes de départ chauffage en sortie PAC, par groupe de déperdition surfacique, pour les logements équipés d'au moins un autre type d'émetteur que du plancher chauffant. Le tableau à droite donne le détail par zone climatique H1, H2 ou H3	99
Figure 89 : Température de la source froide durant la production de chauffage	100
Figure 90 : Température moyenne de source froide mesurée par région climatique sur l'ensemble de l'échantillon	101
Figure 91 : Répartition par usage de l'électricité consommée pour le poste chauffage sur l'ensemble des logements	101
Figure 92 : Répartition par usage de l'électricité consommée pour le poste chauffage dans chacun des logements	102
Figure 93 : Nombre de cycles moyens journaliers de fonctionnement de la PAC en saison de chauffe, en fonction du fabricant	103
Figure 94 : Graphiques principaux faisant état du fonctionnement de la PAC du logement 081059	104
Figure 95 : Nombre moyen de cycles journaliers de la PAC en fonction de son surdimensionnement	104
Figure 96 : Puissance électrique minimale de la PAC en saison de chauffe hors production de chaleur	105
Figure 97 : Monotone de la puissance électrique appelée hors production de chaleur par la PAC du logement 002026	106
Figure 98 : Puissance électrique minimale de la PAC hors saison de chauffe hors production de chaleur	107
Figure 99 : Illustration d'une courbe de monotone électrique d'une PAC avec le logement 014088	108
Figure 100 : Méthode employée pour cadrer la plage de consommation des circulateurs	108
Figure 101 : Plages d'estimations de la consommation annuelle des pompes pour le chauffage	109
Figure 102 : Comparaison des SCOP mesurés avec et sans prise en compte de la consommation des circulateurs hors source froide (valeur d'estimation haute)	109
Figure 103 : Puissance maximum des circulateurs de chauffage (les logements sont triés par ordre décroissant de consommation annuelle estimée pour les circulateurs)	110
Figure 104 : Durée de fonctionnement des circulateurs de chauffage (les logements sont triés par ordre décroissant de consommation annuelle estimée pour les circulateurs)	110
Figure 105 : Corrélations de la puissance maximale des circulateurs avec le fabricant, la surface des logements et le nombre de pompes	111
Figure 106 : Corrélations de la durée de fonctionnement des circulateurs avec les déperditions, la consommation de la PAC pour le chauffage et le facteur de dimensionnement de la PAC (puissance thermique à T°C base / déperditions)	112
Figure 107 : Distribution des ΔT aller-retour de production de chauffage par la PAC	112
Figure 108 : Fonctionnement d'une bouteille de découplage	113
Figure 109 : Equilibre des bouteilles de découplage hydraulique de notre échantillon	114
Figure 110 : Corrélation entre le SCOP mesuré et le SCOP théorique de Carnot	115

Figure 111 : Corrélation du SCOP de Carnot avec la température de production du chauffage et la température de la source froide.....	115
Figure 112 : Corrélation entre le SCOP chauffage mesuré et la température de production du chauffage.....	116
Figure 113 : Corrélation entre le SCOP chauffage mesuré et la température de la source froide.....	116
Figure 114 : Facteur d'efficacité par rapport à Carnot en fonction du nombre moyen de cycles par jour de la PAC en saison de chauffe.....	118
Figure 115 : Facteur d'efficacité par rapport à Carnot en fonction du SCOP fabricant.....	118
Figure 116 : Facteur d'efficacité par rapport à Carnot en fonction du SCOP mesuré.....	118
Figure 117 : Facteur d'efficacité par rapport à Carnot en fonction de la température de production de chauffage.....	118
Figure 118 : Comparaison des SCOP mesurés par région climatique.....	119
Figure 119 : SCOP mesurés selon le type d'émetteur et la zone climatique – PAC air/eau.....	120
Figure 120 : SCOP mesurés selon le type d'émetteur et la zone climatique – PAC eau/eau.....	121
Figure 121 : SCOP mesurés en fonction du niveau d'isolation – PAC air/eau.....	122
Figure 122 : SCOP mesurés en fonction du niveau d'isolation - PAC eau/eau.....	122
Figure 123 : Comparaison des PAC monobloc.....	123
Figure 125 : Chute nocturne de la température ambiante dans les séjours des logements en hiver.....	125
Figure 126 : Hypothèses de calcul utilisées pour évaluer les consommations des appoints.....	125
Figure 127 : Chaleur utile totale (PAC + autres générateurs d'appoint) absorbée par les logements pour le chauffage.....	126
Figure 128 : Chaleur utile surfacique totale (PAC + autres générateurs d'appoint) absorbée par les logements pour le chauffage.....	126
Figure 129 : Modèle d'estimation du besoin de chauffage.....	127
Figure 130 : Electricité totale consommée par les PAC pour le chauffage.....	128
Figure 131 : Electricité totale surfacique consommée par les PAC pour le chauffage.....	128
Figure 132 : Thermosensibilité des consommations électriques des PAC pour le chauffage.....	129
Figure 133 : Puissance électrique, utile et COP d'une PAC moyenne en fonction de la température extérieure.....	130
Figure 134 : Part relative de la consommation d'appoint joule d'une PAC moyenne en fonction de la température extérieure.....	130
Figure 135 : Température extérieure moyenne mesurée sur les PAC de l'échantillon et nombre de sites instrumentés à date.....	131
Figure 136 : Consommation des PACS, production de chaleur et COP mesurés lors de la vague de froid du 20 janvier 2024.....	131
Figure 137 : Courbe de charge horaire d'appel de puissance électrique de la PAC d'un logement moyen du 1er décembre 2023 au 29 février 2024.....	132
Figure 138 : Courbe de charge électrique d'un logement moyen français - Panel Elecdom année 5.....	133
Figure 139 : SCOP ECS mesurés sur chaque installation.....	133
Figure 140 : COP saisonnier (SCOP) ECS mesuré sur les PAC air/eau.....	134
Figure 141 : COP saisonnier (SCOP) ECS mesuré sur les PAC eau/eau.....	135
Figure 142 : COP saisonnier de l'ECS sur chaque installation et facteur d'efficacité par rapport à Carnot.....	136
Figure 143 : COP saisonnier de Carnot (SCOP Carnot) ECS mesuré sur les PAC air/eau et eau/eau.....	137
Figure 144 : Efficacité par rapport à Carnot des PAC air/eau et eau/eau.....	138
Figure 145 : COP saisonnier de Carnot (SCOP Carnot) ECS mesuré sur les PAC eau/eau.....	138
Figure 146 : Efficacité par rapport à Carnot des PAC eau/eau.....	139
Figure 147 : Températures de production de charge du ballon ECS de chaque logement, triées par moyenne croissante.....	140
Figure 148 : Répartition par usage de l'électricité consommée pour le poste eau chaude sanitaire sur l'ensemble des logements.....	141
Figure 149 : Répartition par usage de l'électricité consommée pour le poste eau chaude sanitaire dans chacun des logements.....	142
Figure 150 : Corrélation entre le SCOP ECS mesuré et la part non thermodynamique des consommations (appoints électriques, consommation hors production).....	142
Figure 151 : Ecart au modèle de SCOP en fonction de la température de production d'ECS moyenne.....	143
Figure 152 : Chaleur utile totale du poste ECS pour chaque logement.....	144
Figure 153 : Chaleur utile surfacique totale du poste eau chaude sanitaire de chaque logement.....	145
Figure 154 : Chaleur utile ramenée au nombre de personnes du foyer du poste eau chaude sanitaire.....	145
Figure 155 : Chaleur utile du poste eau chaude sanitaire en fonction du nombre de personnes composant le foyer.....	146
Figure 156 : Répartition de la chaleur consommée entre l'ECS et le chauffage.....	147
Figure 157 : Electricité totale consommée par les PAC pour l'ECS.....	148

Figure 158 : Electricité totale surfacique consommée par les PAC pour l'ECS	148
Figure 159 : Répartition de l'électricité consommée entre l'ECS et le chauffage	149
Figure 160 : Température intérieure et production de froid utile dans le logement 075084 – été 2024	151
Figure 161 : Température intérieure et production de froid utile dans le logement 002026 – été 2024	152
Figure 162 : Part de la consommation d'électricité des PAC dans le général des logements (en valeur absolue et surfacique)	153
Figure 163 : Puissance électrique appelée par la PAC et le général des logements lors de la vague de froid du 20 janvier 2024	154
Figure 164 : Temps de retour sur investissement du remplacement d'une chaudière gaz par une PAC après déduction des aides	155
Figure 165 : Temps de retour sur investissement du remplacement d'une chaudière gaz par une PAC sans déduction des aides	156
Figure 166 : Abaques déduits des simulations de TRI du remplacement d'une chaudière gaz par une PAC sur les logements	157
Figure 167 : Echelles des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre du DPE	158
Figure 168 : Valeurs des degrés-heures du DPE pour chaque mois de l'année et zone climatique	159
Figure 169 : Formule de calcul du coefficient Fj selon l'inertie du logement	159
Figure 170 : SCOP forfaitaires des pompes à chaleur air/eau et eau/eau considérés dans le calcul 3CL	160
Figure 171 : Rendements d'émission considérés dans le calcul 3CL	160
Figure 172 : Rendements de distribution du chauffage considérés dans le calcul 3CL	161
Figure 173 : Rendements de la régulation du système de chauffage considérés dans le calcul 3CL	161
Figure 174 : Consommation totale d'électricité d'un logement moyen, source Panel Elecdom année 1	163
Figure 175 : Apports internes en fonction du nombre de personnes	163
Figure 176 : Comparaison du besoin de chauffage mesuré et du besoin évalué par le calcul 3CL	164
Figure 177 : Comparaison des degrés-heures calculés à 19°C avec la température extérieure mesurée et des degrés- heures du DPE	164
Figure 178 : Comparaison des températures extérieures mesurées et des valeurs du DPE	165
Figure 179 : Comparaison des degrés-heures de la campagne de mesure « repris à 19°C » avec les degrés-heures prenant en compte les températures ambiantes réelles	165
Figure 180 : Températures ambiantes mesurées dans la campagne : statistiques par zone climatique et sur l'échantillon entier	165
Figure 181 : Comparaison des degrés-heures aux températures ambiante et extérieure mesurées aux degrés-heures du DPE	165
Figure 182 : Evolution de l'écart entre le besoin de chaleur mesuré et calculé, en fonction des hypothèses du DPE et des valeurs mesurées	166
Figure 183 : Ecart entre le SCOP mesuré et le SCOP par défaut du DPE	167
Figure 184 : Comparaison des SCOP mesurés aux SCOP du calcul 3CL, à l'échelle des 100 logements de la campagne	167
Figure 185 : Comparaison des SCOP mesurés aux SCOP du calcul 3CL pour les PAC air/eau	168
Figure 186 : Comparaison des SCOP mesurés aux SCOP du calcul 3CL pour les PAC eau/eau	168
Figure 187 : Zones climatiques de la réglementation européenne (ErP) et de la réglementation thermique française	169
Figure 188 : Conditions des mesures des COP instantanés pour l'ERP	170
Figure 189 : Illustration de l'écart de SCOP selon la région climatique de l'ERP	172
Figure 190 : Comparaison entre SCOP mesuré et le SCOP ERP	172
Figure 191 : Comparaison des SCOP mesurés aux SCOP par défaut du DPE et ERP	173
Figure 192 : Comparaison des lois d'eau de l'ERP selon la zone climatique	174
Figure 193 : Nombre d'heures utilisées pour le calcul du SCOP	175
Figure 194 : Comparaison des lois d'eau	176
Figure 195 : Nombre d'heures de chauffe des classes climatiques de l'ERP et des zones climatiques réglementaires françaises, fichiers RT 2012 du 1er octobre 0h au 20 mai 0h	177
Figure 196 : Occurrence de la température extérieure des zones climatiques ERP	177
Figure 197 : Comparaison du climat des régions H1a, H2a, H2b, H2c, H2d et H3 (réglementation française) et celui des régions A, C et W (ERP)	178
Figure 198 : Correction du COP déclaré ERP pour le logement 72	179
Figure 199 : COP déclaré de la PAC du logement 72	180
Figure 200 : COP mesuré de la PAC du logement 72	180
Figure 201 : Données d'analyse du logement 72	180
Figure 202 : Correction du COP déclaré ERP pour le logement 14	181
Figure 203 : Données d'analyse du logement 14	182
Figure 204 : Correction du COP déclaré en ERP sur sept logements	182

Figure 208 : Projets de recherche d'évaluation des installations de pompes à chaleur réalisés par le laboratoire du Fraunhofer Institut, ISE, à Freiburg en Allemagne	185
Figure 206 : Communiqué de 2011, Marek Miara, Fraunhofer Institut, sur les performances des PAC sur le terrain	186
Figure 211 : Communication du Fraunhofer sur l'évolution des SCOP (SPF) mesurés au fil du temps.	187
Figure 212 : Evolution des performances d'une PAC et combinaison possible avec des énergies d'appoints.	187
Figure 213 : SCOP / AZ en fonction du ballon tampon de chauffage.....	188
Figure 214 : Définition du COP (AZ)	189
Figure 211 : Evolution annuelle de différentes températures de sources de captation de PAC en Allemagne.....	189
Figure 216 : SCOP moyen en PAC air/eau sans les circulateurs.....	190
Figure 217 : SCOP moyen en PAC géothermique.....	191
Figure 214 : Suivi des consommations des veilles pendant le projet WP Smart	192
Figure 219 : Influence des auxiliaires dans le SCOP (correction faite sur les numérotations d'indice des AZ).....	193
Figure 216 : Synthèse des résultats sur les PAC air/eau de la campagne [source 4] ³⁵ du Fraunhofer.	193
Figure 217 : Synthèse des résultats sur les PAC géothermiques de la campagne [source 4] ³⁵ du Fraunhofer	194



EXPERTISES

PERFORMANCE POMPES A CHALEUR

La campagne de mesure a montré que la performance réelle des PAC air/eau en maisons individuelles est très bonne ce qui fait de cette technologie un système très efficace pour la décarbonation du chauffage.

La campagne a mis en lumière plusieurs enjeux importants pour que la PAC puisse être à la hauteur des attentes en termes de décarbonation des usages chauffage et ECS dans le bâtiment :

- Un enjeu de montée en compétence de la filière : 1/3 des PAC de la campagne ont des performances qui peuvent être améliorées.
- La PAC doit être associée à des gestes d'isolation pour réduire le besoin de chauffage et atteindre les objectifs climatiques
- Produire plus de PAC en Europe et se démarquer sur les sujets du suivi des performances, transparence vis-à-vis de l'utilisateur, réglage automatique de la loi d'eau et remontées d'alertes.

Les performances des PAC air/eau en maisons individuelles sont très bonnes. Ce système de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire est un outil clé pour la décarbonation de ces usages, en remplacement de chaudières fossiles.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.