



PERF IN MIND

Rénovation performante de maisons individuelles

Rapport final

Analyse multicritère énergie, confort, santé, satisfaction, coût

Etude réalisée avec le soutien de l'ADEME, dans le cadre de son appel à projet recherche "vers les bâtiments responsables à l'horizon 2020"

Novembre 2021

Étude coordonnée par la SCOP Enertech, 26160 Pont-de-Barret
04 75 90 18 54 - www.enertech.fr



Equipe du projet :

SCOP Enertech : Nicolas ANDREAU, Thierry RIESER, Julien SPILEMONT, Mickaël GUERNEVEL, Jean-Paul ZIMMERMANN, Muriel DUPRET (Consultante indépendante)

Effinergie : Sébastien LEFEUVRE

Médiéco : Claire-Sophie COEUEVEZ, Soline MARTIN, Anissia ROUSSEAU

Institut négaWatt : Bruno DANIEL

Soutiens du projet et Comité de Pilotage :

ADEME : Jonathan LOUIS, Etienne MARX

Région Bourgogne Franche Comté : Jean-Luc KRIEGER, Julie GONZALES, Vincent PANISSET

Région Centre Val de Loire : William PALIS, Cédric PAYET, Luc GUILLIER (ADIL)

Région Grand Est : Matthieu FLAHAUT, David LEWANDOWSKI

Région Normandie : Alain DEFFONTAINES, Aurélie COGNARD

Dorémi : Jérémy CELSAN, Camille JULIEN

Participation au Comité technique :

CSTB : Stéphanie DEROUINEAU

AQC : Martin GUER

POUGET Consultants : Charles ARQUIN et Julien PARC

***Nous tenons à remercier ici l'ensemble des soutiens du projet
et les participants aux comités techniques.***

Ce rapport constitue le **Livrable D3.6** prévu à la convention ADEME n°1804C0030, et intègre le Livrable D3.7 consacré à la qualité de l'air intérieur ([partie 9](#) du rapport).

Il est complémentaire aux livrables précédents du projet :

- Livrable D2.1 « *Panorama des dispositifs existants de rénovation performante de maisons individuelles* » réalisé par Effinergie ;
- Livrable D3.5 Etude Sciences Sociales : « *Etat de l'art des études portant sur les pratiques et modes d'habiter consécutives à des travaux de rénovation* », « *L'expérience d'usager-occupant - Analyse des entretiens et observations sur 10 maisons/usagers* » et « *Rapport de synthèse avec recommandations* », réalisés par l'Institut négaWatt.

Tous ces livrables sont disponibles sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>.

Des fiches opérations de certaines maisons suivies dans le cadre de Perf in Mind sont également disponibles sur l'Observatoire BBC d'Effinergie : <https://www.observatoirebbc.org/perfinmind>.

Plan du rapport :

INTRODUCTION.....	5
RESUME DE L'ETUDE	7
GLOSSAIRE	14
PRESENTATION GENERALE DES RENOVATIONS	15
1 Description de l'échantillon.....	15
1.1 Description des participants	15
1.2 Description des maisons et de leur environnement	18
1.3 Accompagnement de la rénovation	26
1.4 Maintenance des installations.....	43
1.5 Usage et satisfaction	47
NATURE DES TRAVAUX	57
2 Le bâti.....	58
2.1 Les murs.....	58
2.2 La toiture.....	65
2.3 Le plancher bas	70
2.4 Les menuiseries	76
2.5 Les ponts thermiques.....	83
2.6 Etanchéité à l'air de l'enveloppe	89
2.7 Appréciation de la performance globale de l'enveloppe.....	92
3 Les systèmes.....	102
3.1 Ventilation	102
3.2 Chauffage	108
3.3 Production d'Eau Chaude Sanitaire.....	114
3.4 Installation photovoltaïque	115
CONSOMMATIONS	116
Méthodologie	116
4 Chauffage	119
4.1 Consommation annuelle mesurée (utile, finale, primaire).....	119
4.2 Paramètres influant sur la consommation	125
4.3 Approche calculatoire.....	144
5 Eau chaude sanitaire mesurée	157
5.1 Consommation annuelle.....	157
5.2 Paramètres influant sur la consommation	159

6 Usages électriques.....	168
6.1 Ventilation	168
6.2 Auxiliaires de chauffage	175
6.3 Autres usages de l'électricité	178
7 Bilan énergétique global et comparaison aux objectifs.....	180
7.1 Bilan en Consommation de chauffage et objectif des STR	180
7.2 Bilan en Chauffage et ECS sur l'échelle de l'ancien DPE.....	182
7.3 Bilan sur 5 usages sur l'échelle du nouveau DPE	183
7.4 Bilan en Cep 5 usages et objectif BBC	185
7.5 Bilan tous usages et objectif Energie positive	187
CONFORT	189
8 Confort thermique.....	189
8.1 Températures en hiver	190
8.2 Température été	197
9 Qualité de l'air intérieur	204
9.1 Taux de CO2	204
9.2 Polluants de l'air intérieur	209
ANALYSE ECONOMIQUE	219
10 Analyse économique	219
10.1 Auto-réhabilitation.....	220
10.2 Amélioration de l'enveloppe.....	221
10.3 Ventilation	226
10.4 Systèmes de chauffage et ECS	227
10.5 Autres coûts liés à l'énergie	228
10.6 Coûts des Diagnostics, AMO, Maîtrise d'œuvre et Test d'infiltrométrie.....	229
10.7 Coût total à financer.....	230
10.8 Subventions et plan de financement.....	232
10.9 Conclusion du volet économique	233
Conclusion.....	235
Annexe 1 : paramètres variables du calcul du besoin de chauffage.....	236
Annexe 2 : détails de la méthodologie d'analyse du chauffage et ECS	238
Annexe 3 : bibliographie	245

INTRODUCTION

Quel est le rythme actuel de rénovation performante des maisons individuelles en France ?

La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) définit l'objectif des politiques de rénovation énergétique du parc immobilier français, qui est d'atteindre les normes « bâtiment basse consommation » (BBC) ou équivalent à horizon 2050 (article 1, III).

Sur cette base, nous considérerons dans cette étude comme performante toute rénovation complète (traitant les 6 postes de travaux) répondant au niveau BBC rénovation (certifié ou non), visant le facteur 4 par un bouquet de travaux pré-calculé (type Solutions Techniques de Rénovation, ou STR, utilisées notamment dans le cadre du dispositif Dorémi), passive ou à énergie positive.

Le secteur des maisons individuelles représente 70% des consommations d'énergie du secteur résidentiel. Pourtant, le nombre de rénovations performantes dans ce secteur est bien inférieur à celui des logements collectifs. En effet, l'enquête réalisée par Effinergie dans le cadre du projet **n'a permis d'identifier que 3780 maisons individuelles rénovées à un niveau performant** (voir le rapport « *Panorama des dispositifs existants de rénovation performante de maisons individuelles* » sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>).

La difficulté de ce secteur est d'atteindre les particuliers, ce qui nécessite un accompagnement de proximité réalisé notamment par les Régions et les Espaces Conseillers FAIRE. Le Panorama réalisé par Effinergie permet de mettre en lumière les dispositifs d'incitation à la rénovation performante dans le secteur diffus et de partager leurs retours d'expérience.

Quelle est la performance réelle de ces rénovations ?

Dans le cadre de la lutte contre le dérèglement climatique et contre la précarité énergétique, mais aussi dans l'établissement d'une relation de confiance entre les financeurs, les professionnels du bâtiment et les particuliers, ce sont les performances réelles mesurées qui comptent vraiment, et non les calculs théoriques réalisés avant travaux.

C'est pourquoi l'étude Perf in Mind comporte une importante Campagne de Mesure sur plus de 100 maisons rénovées à un niveau performant, qui ont été sélectionnées avec les partenaires du projet pour constituer un panel diversifié. Deux niveaux d'instrumentation ont été réalisés :

- 72 logements en suivi dit « base » (68 au final après 4 abandons) : mesure en continu du confort, suivi des consommations énergétiques par relevé des compteurs, relevé des consommations de bois et analyse des facteurs ;
- 40 logements en suivi dit « avancé » (38 au final après 2 abandons) : instrumentation communicante des consommations énergétiques et du confort, mesures instantanées à l'instrumentation des débits de ventilation et de puisages ECS, mesures de qualité d'air intérieur, étude sur l'expérience d'occupant usager.



Figure 1 : Schéma de l'instrumentation des maisons en suivi « avancé ».

Le suivi avancé permet ainsi une compréhension plus globale du fonctionnement du logement, permettant d'expliquer les performances mesurées (bonnes ou décevantes) à travers des variables explicatives, débits mesurés, rendements calculés etc.

Cette campagne de mesure, associée à des questionnaires et l'analyse des documents recueillis sur les travaux effectués (études thermiques, devis et factures des travaux, test d'infiltrométrie etc.), permet d'analyser les consommations énergétiques globales et par postes de ces rénovations performantes.

Vers une définition globale de la performance, incluant le confort et la santé des occupants

En complément de la performance énergétique, l'étude permet de qualifier le confort hygrothermique d'été et d'hiver des occupants (voir [partie 8](#)) ainsi que la qualité d'air intérieure (CO2, formaldéhyde, composés organiques volatils légers (COVL), composés organiques volatils totaux (COVT), particules fines (PM2,5) et Radon) qui est un enjeu important de santé des occupants (voir [partie 9](#)).

De plus, la satisfaction et l'appropriation des occupants a été étudiée par une enquête sociologique comportant un volet qualitatif avec 10 entretiens semi-directifs, organisés autour de 5 thèmes : les travaux, la satisfaction, l'appropriation, les usages et les pistes d'amélioration (voir Livrable D3.5 sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>) et un volet quantitatif sur la base d'un questionnaire (voir la [partie 1.5](#)).

Retours d'expérience pour la massification de la rénovation performante

L'accompagnement des particuliers est un enjeu spécifique de la maison individuelle. Ainsi la [partie 1.3.1](#) du rapport présente le type d'accompagnement dont les ménages ont bénéficié, mettant en valeur les clés du succès des différents dispositifs.

Enfin, la question des coûts de rénovation est essentielle pour le déploiement à grande échelle de la rénovation performante. Elle est abordée en [partie 10](#) sur la base des données recueillies, et en distinguant les travaux énergétiques et induits des autres travaux.

L'ensemble du projet et du rapport vise ainsi à proposer un retour d'expérience multicritère et basé sur la mesure réelle sur la rénovation performante des maisons individuelles.

RESUME DE L'ETUDE

En synthèse de ce rapport, nous vous proposons une grille de lecture chronologique de la vie d'un projet de rénovation, de l'accompagnement initial à la satisfaction après travaux. Des renvois permettent de faire le lien avec les différents chapitres du rapport, dont le plan est plus thématique.

On rappelle en préambule que nous appellerons « performant » dans ce rapport les rénovations visant la performance BBC rénovation ou équivalent, ou plus performant. Pour atteindre ce niveau, ces rénovations ont généralement comporté 6 postes de travaux ad minima : isolation des murs, toiture, plancher bas, rénovation des menuiseries, ventilation, et système de chauffage et ECS. Les travaux ont été réalisés en une étape : il s'agit donc de rénovations « complètes et performantes ».

L'accompagnement des ménages en amont

La rénovation performante d'une maison individuelle est un parcours souvent long et complexe. Les ménages sont parfois perdus face à la multiplicité des acteurs, la complexité des dispositifs de financement, les sollicitations non souhaitées et dont la qualité peut être mise en doute par les ménages (exemple du démarchage téléphonique pour les travaux à 1€).

Heureusement, différents dispositifs d'accompagnement et services gratuits de conseil existent pour informer et accompagner les ménages tout au long de ce parcours. Ainsi les rénovations suivies dans le cadre de la présente étude ont toutes bénéficié d'un accompagnement à la rénovation performante. Différents dispositifs publics régionaux et locaux sont représentés, ainsi qu'un dispositif privé présent sur différents territoires en partenariat avec les collectivités territoriales. Ces dispositifs, leurs modes d'action, leur définition de la performance, et les clés de leur succès sont décrits au chapitre [1.3](#).

Concevoir la performance en rénovation

Sur les maisons suivies dans le cadre de cette étude, 3 approches ont été utilisées : l'objectif BBC rénovation, les bouquets de travaux dits « solutions techniques de rénovation » ou STR, et l'objectif d'une rénovation à énergie positive sur le modèle EnergieSprong. Ces approches sont décrites au chapitre [1.3.2](#).

Dans tous les cas, la conception de la performance commence par le relevé de l'existant : soit un audit accompagné d'un calcul thermique définissant des scénarii de rénovation dont un scénario BBC ; soit un « état des lieux architectural et technique » permettant de choisir un bouquet de travaux adapté à la

maison mais aussi de définir la nature des matériaux dans le respect de la migration de vapeur (voir au [2.1.1](#) les statistiques sur le choix des isolants en fonction de la nature des murs).

Cependant, la collecte d'informations sur les rénovations en comparant les rapports de diagnostics et état des lieux avec les factures finales et le relevé sur site (méthodologie présentée au chapitre [Nature des travaux](#)) a permis de s'apercevoir que dans certains cas les préconisations initiales n'ont pas été respectées. Ainsi 10 maisons sur 62 visant le niveau BBC rénovation et 3 maisons sur 32 appliquant une STR n'en ont en réalité pas respecté les préconisations (voir [2.7.3](#)). Ce constat appelle à un meilleur contrôle des devis finaux voire du chantier par les dispositifs d'accompagnement.

Conception de l'enveloppe

Les statistiques des niveaux de performance de l'enveloppe par dispositif sont présentées au chapitre [2](#). Il est intéressant de constater que les écarts entre les différents niveaux d'isolation sont assez limités. D'une part ils sont dans la très grande majorité supérieurs aux niveaux demandés par les différentes subventions, ce qui confirme leur rôle prescripteur. Au-delà de cette valeur, les épaisseurs d'isolants ne varient dans la majorité des cas que d'une poignée de cm. Les efforts de conception et d'optimisation des épaisseurs d'isolant par le calcul le cas échéant, ne jouent ainsi que sur une variation du coût marginal de l'isolation de quelques € par m² de parois...

L'étude par le calcul de la qualité de l'enveloppe a été réalisée au [2.7](#). Un des résultats notables est la mise en évidence de contre-performances liées à l'absence d'isolation d'une partie des murs ou de l'absence d'isolation du plancher bas (pas même en périphérie). L'isolation complète des murs (même en épaisseur réduite au niveau d'un escalier par exemple) nous semble donc essentielle, ainsi que l'isolation périphérique en cas d'ITE pour rompre le pont thermique de la dalle basse, en enterré le cas échéant. On peut souligner également l'intérêt des robots capables de projeter de l'isolant au plafond des vides sanitaires de faible hauteur, pour éviter le plus possible de les laisser non isolés.

L'importance du traitement des ponts thermiques est également rappelée. L'inspection par caméra infrarouge réalisée sur les maisons en suivi « avancé » a mis en évidence divers ponts thermiques importants (voir [2.5.2](#)). Parmi eux, le cas d'une maison ayant vécu une rénovation par « gestes » (ITE réalisée précédemment) révèle d'importants ponts thermiques autour des menuiseries, dus à l'impossibilité de traiter l'isolation des tableaux. Ce triste constat conforte les conclusions de l'étude *Rénovation performante par étapes*¹.

L'étude présente également un retour d'expérience sur la modélisation thermique des maisons : plusieurs tentatives d'explication du besoin de chauffage sont explorées. L'approche classique avec les DJU (testée au [4.2.1](#)) ne fonctionne pas à ce niveau de performance, où les apports gratuits (solaires et internes) sont majoritaires par rapport au besoin de chauffage. Une modélisation plus fine est donc nécessaire. Une modélisation détaillée avec l'outil « Besoin simple » a été réalisée sur l'ensemble des maisons (voir le [4.3](#)). Les résultats mitigés de ce calcul nous rappellent que toute modélisation thermique ne vaut que par la précision des données d'entrées. Or les logements sont des objets complexes dont les variables technique et d'usage sont nombreuses et pour certaines difficiles à mesurer. Le recollage entre mesure et calcul reste donc un exercice difficile, et qui ne peut aboutir à une corrélation parfaite. Cependant, on peut noter que plus on inclut de données mesurées dans le calcul, plus on en réduit l'incertitude. Les efforts de mesure déployés dans ce projet au niveau « base » et au niveau « avancé » sont justifiés par ce gain

¹ Etude réalisée pour l'ADEME par Dorémi et Enertech. Rapport disponible sur <https://bibliothèque.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/4168-renovation-performante-par-etapes.html>

important en précision d'analyse. L'ouverture des fenêtres reste la principale variable d'usage non mesurée et explique probablement l'écart restant entre le calcul le plus détaillé et la mesure, en complément d'incertitude sur les métrés.

Conception des systèmes de chauffage et ECS

Sur plusieurs maisons, des chaudières existantes ont été conservées. Les mauvais rendements mesurés dans ce cas (voir [4.2.5](#)) nous invitent à rappeler que la chaudière devrait faire l'objet d'un contrôle dans les phases de diagnostic ou d'état des lieux du projet. Selon la puissance, la modulation, les possibilités de réglage de la chaudière existante, le maintien de la chaudière peut être discuté dans certains cas, mais dans d'autres il faut absolument procéder au remplacement de ce générateur au risque d'annuler une bonne partie des bénéfices énergétique de l'isolation de l'enveloppe (voir [4.1.2](#)).

Plusieurs modes de chauffages sont représentés, des chaudières gaz aux pompes à chaleur et à la biomasse. Tous conduisent à des performances globalement satisfaisantes, mis à part les rares chauffages électriques directs qui restent très impactants en énergie primaire. L'analyse des rendements est l'occasion de rappeler qu'une chaudière gaz à condensation ne condense que si le régime de température est assez bas. De même le COP des PAC est d'autant meilleur que l'émission est réalisée à basse température (voir [4.2.5](#)).

Dans tous les cas, il nous semble également indispensable de prévoir une régulation terminale performante. En effet, l'impact d'un degré de plus dans ces maisons rénovées à un niveau performant se traduit par une augmentation de la consommation de chauffage de +17% (voir [4.3](#)). Il est donc très important d'avoir une régulation précise pour assurer le confort sans faire déraiser la facture. Les robinets thermostatiques ne suffisant plus à réguler précisément les bâtiments performants, l'ajout d'un thermostat nous semble une bonne pratique à généraliser. De plus une sonde de température extérieure pour établir une loi d'eau permet d'assurer un meilleur confort et un meilleur rendement de génération (voir [4.2.5](#)).

Concernant les poêles à bûches, qui ne peuvent pas être équipés de thermostats, nous verrons au [8.1.4](#) que la variation de température dans la journée est relativement maîtrisée. Ce type d'émission, moins bien régulée mais très simple et peu coûteuse, a toute sa place dans des projets de rénovation performante, de même que les poêles à granulés.

L'eau chaude sanitaire (ECS) est étudiée au chapitre [5](#). Les mesures nous rappellent l'intérêt des équipements hydro économes pour maîtriser les usages à confort égal (voir [5.2.2](#)). L'étude également souligne les rendements dégradés des chaudières gaz en production ECS, ainsi que celui de certaines PAC. Cependant les niveaux de performance restent bons. On note un bon fonctionnement moyen des CESI (division par deux de la consommation d'ECS en moyenne), même si certains semblent dysfonctionner (voir [0](#)).

Conception de la ventilation

Plusieurs chapitres du rapport abordent les différents enjeux de la ventilation. Ce sujet, aujourd'hui encore peu investi par les acteurs (peu d'artisans se définissent comme « ventilistes ») et objet de nombreuses non-qualités est pourtant un sujet crucial du bâtiment performant, à la croisée d'enjeux parfois contradictoires :

- La ventilation est souvent mal comprise par les utilisateurs et elle génère dans 30 % des cas des nuisances acoustiques (en simple comme en double flux) (voir [1.5](#)) ;
- Quel que soit le type de ventilation, une bonne mise en œuvre et un bon réglage est nécessaire au bon fonctionnement et à la satisfaction des habitants. Or les débits ont globalement été mal réglés : on observe de nombreux sur-débits en ventilation simple flux hygroréglable, et de nombreux sous-débits en ventilation double flux (voir [3.1.3](#)) ;
- La question de la maintenance et des coûts associés doit être abordée plus en amont. L'enquête sociologie a montré que les ménages n'ont parfois pas été avertis de ces coûts. 41 % sont moyennement satisfaits ou insatisfaits de ce poste de dépenses (voir [1.5](#)).
- Les consommations électriques sont généralement plus importantes en double flux, mais peuvent être maîtrisées par une bonne conception et une bonne mise en œuvre (voir [6.1](#)). Quoi qu'il en soit le gain énergétique sur le chauffage compense largement la surconsommation d'électricité, (voir [6.1.3](#)) ;
- Le choix de la ventilation et notamment le taux de renouvellement d'air a un impact sur la qualité d'air intérieur, ce qui plaide en défaveur de la solution hygroréglable sur l'ensemble des polluants mesurés, et en particulier sur la question du Radon (voir le chapitre [9](#)) ;
- Enfin nous verrons au [10.3](#) que la ventilation double flux est plus chère que la solution hygroréglable.

Les coûts et le montage financier de la rénovation performante

Le chapitre [10](#) est consacré à l'analyse des coûts et du financement de la rénovation.

Tout d'abord il faut souligner la part non négligeable de travaux réalisés en auto-réhabilitation dont l'importance est étudiée au [10.1](#).

Sur l'analyse des prix, certaines observations nous interpellent. La corrélation des prix à la performance de l'enveloppe (résistance thermique élevée, vitrage performante) s'avère totalement négligeable devant le bruit de fond de la variabilité des prix. Certains prix unitaires nous semblent également élevés, laissant supposer qu'il y aura une perspective d'évolution à la baisse des coûts de certains lots. Globalement on constate un coût moyen pour le périmètre des 6 postes définissant une rénovation complète de 62 k€ TTC. S'y ajoute en moyenne 5 k€ TTC d'autres travaux énergétiques, et 20 k€ TTC de travaux non énergétiques.

Le marché de la rénovation performante en maison individuelle n'est aujourd'hui encore qu'à ses débuts (nous n'avons recensé que moins 4000 rénovations BBC ou équivalent en France²). Certains artisans ont également dû investir du temps en formation à de nouvelles techniques, alors que leur carnet de commande en rénovation performante reste incertain.

Aussi nous espérons qu'avec la multiplication attendue et nécessaire des rénovations complètes et performantes, le volume de ce marché va se développer, créant ainsi les conditions de la confiance. On peut souhaiter qu'un marché plus dynamique génère une courbe d'apprentissage et de réduction des coûts. Ainsi la massification de la rénovation performante doit permettre demain une meilleure rentabilité économique de la rénovation énergétique, et de généraliser l'équilibre en trésorerie (équivalence entre les factures énergétiques avant travaux et les mensualités de prêts + factures après travaux), qui est déjà effectif sur certaines rénovations performantes.

² Voir le rapport « *Panorama des dispositifs existants de rénovation performante de maisons individuelles* » réalisé par Effinergie, disponible sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>

Quoi qu'il en soit, il est extrêmement positif que les importants dispositifs d'aide et de prêt bonifiés, présents à l'échelle nationale et régionale, ont permis, avec l'accompagnement des ménages par les différents dispositifs, le bouclage du plan de financement de ces 106 rénovations pionnières.

Accompagnement en phase chantier

L'étude sociologique livre quelques retours sur le ressenti des ménages (voir [1.5](#)). Si l'accompagnement par les dispositifs en phase chantier a été apprécié sans réserve par 67 % des répondants, en revanche 17 % n'en ont pas été satisfaits. À la question « *Si c'était à refaire ?* », 10 ménages sur les 54 qui n'ont pas eu de maître d'œuvre sur leur chantier déclarent qu'ils feraient appel à un maître d'œuvre pour coordonner le chantier. Cependant peu nombreux sont ceux qui ont engagé la dépense de faire appel à un architecte ou à un bureau d'étude.

Et de fait, l'analyse du questionnaire sur la phase chantier (voir [1.3.3](#)) montre qu'un tiers des ménages a eu le sentiment d'avoir eu à gérer seul le chantier.

Au final, la qualité des travaux est jugée satisfaisante par 80% des ménages. La mesure de l'infiltrométrie après travaux (voir [2.6](#)) montre que les performances atteintes sont globalement bonnes : la moyenne de l'étanchéité à l'air atteinte est de $Q_4 = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ par m^2 soit $n_{50} = 3,1 \text{ vol/h}$. Cependant certaines maisons n'ont pas atteint les objectifs fixés, notamment les objectifs particulièrement ambitieux des STR visant un n_{50} de 1 vol/h. Sans être aussi exigeants, certaines valeurs d'infiltrométrie après travaux nous semblent fort élevées (au-delà de $n_{50} = 4,5 \text{ vol/h}$) ce qui impacte la performance. Ce sujet doit donc rester un point de vigilance important en phase chantier. A ce titre les tests d'infiltrométrie réalisés sur chantier ou en fin de chantier ont un rôle à la fois pédagogique pour les artisans et de contrôle de la qualité des prestations.

En fin du chantier, les analyses mettent en évidence l'importance du réglage des installations de ventilation (voir [3.1.3](#)) et de chauffage (voir [4.2.5](#)). Equilibrage du réseau de ventilation, réglage des ventilateurs et contrôle des débits aux bouches sont des bonnes pratiques à généraliser. De même que le réglage de la loi d'eau après rénovation, le réglage et le contrôle du bon fonctionnement du thermostat, la vérification de l'asservissement des pompes au fonctionnement de la chaudière (voir [6.2](#)) sont nécessaires pour maximiser le confort et les économies d'énergies.

Enfin, l'explication du fonctionnement des systèmes installés aux ménages est visiblement perfectible (seulement 61 % des ménages satisfaits, voir [1.5](#)). Plus que la technologie elle-même, c'est le plus souvent l'interface des équipements (notamment des double flux) qui est jugée « peu conviviale » et mérite donc des explications.

L'accompagnement global de la phase chantier, et en particulier des réglages en fin de chantier et l'appropriation des systèmes nous semble donc à renforcer dans les dispositifs d'accompagnement de la rénovation performante. Les enseignements techniques de ce rapport pourraient également alimenter la formation des artisans et entreprises du bâtiment.

Après rénovation : atteinte des objectifs

Les enveloppes sont globalement très performantes et permettent d'atteindre un besoin de chauffage très faible : $45 \text{ kW.h}_{\text{ut}}/\text{m}^2/\text{an}$ en moyenne. On note également que les rénovations sans « contre-performance » (ayant respecté le référentiel visé, ayant isolé toutes les parois ou au moins la périphérie du plancher bas, et ayant maîtrisé les infiltrations) sont nettement moins consommatrices et leur

performance est plus fiable (moins dispersée) que les maisons avec une ou plusieurs contre-performances sur l'enveloppe (voir [4.1.1](#)).

Pour concrétiser ce besoin de chauffage performant en consommation faible, le bon fonctionnement de la production de chauffage et de sa régulation sont essentiels. Les résultats détaillés sont présentés au [4.2](#) et les principales conclusions ont déjà été résumées précédemment pour la phase de conception et de réglage. Les rénovations les plus performantes allient *a minima* et pour l'essentiel une excellente enveloppe et un bon rendement de d'exploitation de chauffage (PAC de COP supérieur à 3 ; rendement chaudière supérieur à 80%, etc.).

Au global, les bilans énergétiques présentés au [chapitre 7](#) sont très positifs :

- 70% des logements après rénovation sont en classe B ou A de l'ancien DPE (celui en vigueur au moment de leur conception),
- La très grande majorité des rénovations ont respecté l'objectif énergétique visé. Si l'on tolère 20% d'écart, ce sont 81% des STR qui respectent leur objectif (défini en consommation de chauffage), 92% des maisons EnergieSprong (objectif défini en bilan énergie positive tous usages), et 95% des rénovations BBC (objectif défini en Cep sur 5 usages).

Les ménages ne s'y trompent pas : ils sont près de 80 % à se déclarer très satisfaits ou plutôt satisfaits du montant de leur facture énergétique. Aucun ne se déclare insatisfait (voir [1.5](#)). Cette réduction de leurs dépenses semble avoir été correctement estimée avant de réaliser les travaux, puisque les prévisions de dépenses énergétiques ont semblé satisfaisantes ou très satisfaisantes à 72 % des ménages qui ont bénéficié de ces calculs.

Confort et qualité d'air après rénovation

Le confort thermique en hiver est excellent, avec 99% de ménages satisfaits (étude sociologique au [1.5](#) et mesure au [8.1](#)). La température moyenne, tous logements confondus, est de 20,0°C ce qui est inférieur à ce qu'on observe pour les logements collectifs.

En été, les températures mesurées sont élevées. Que ce soit avec un critère fixe de 28°C ou confort adaptatif, les résultats sont peu satisfaisants (32% des logements dépassent le critère de 40 heures au-dessus de 28°C, voir le [8.2](#) pour le confort adaptatif). C'est donc un enjeu de conception à ne pas négliger, a fortiori avec le risque de canicule accru dans les années à venir.

Pourtant, même si la satisfaction est un peu moins unanime que pour le confort d'hiver, les ménages sont tout de même 82% à être satisfaits du confort d'été. Dans 88% des cas, les ménages saluent un meilleur voire bien meilleur confort après rénovation qu'avant.

En termes de qualité de l'air, les analyses détaillées au chapitre [9](#) apportent les conclusions suivantes :

- Globalement, les concentrations moyennes des différents polluants sur la semaine de mesure sont faibles sur les 33 maisons où la mesure a été réalisée ;
- La corrélation entre taux de CO₂ et taux de renouvellement d'air est assez bonne. On peut donc affirmer que le taux de renouvellement d'air assuré par la ventilation contribue à la qualité d'air intérieur : plus le renouvellement d'air est élevé, plus la qualité d'air est bonne ;
- Du point de vue du CO₂, si on souhaite être durant 80% du temps en qualité d'air moyenne ou excellente pendant la nuit, il faudrait un taux de renouvellement d'air de 0,5 vol/h, soit le niveau

de renouvellement d'air attendu en simple flux autoréglable ou en double flux, mais pas celui attendu en ventilation hygroréglable. A 0,3 vol/h, soit le taux attendu en simple flux hygroréglable, la qualité d'air n'est moyenne ou excellente que 55% du temps environ.

- En termes de composés organiques volatils (COV) : une majorité de logements (57 %) présentant une concentration moyenne en COVT négligeable sur la semaine de mesure. Les moyennes hebdomadaires plus élevées sont parfois expliquées par les activités des occupants qui engendrent des pics d'émissions élevés mais ponctuels. Dans les autres cas, le bon fonctionnement du système de ventilation est souvent remis en question.
- En ce qui concerne les particules fines (PM) : pour la grande majorité de logements instrumentés, les concentrations en particules fines respectent les lignes directrices de l'OMS. Pour une maison située à proximité de l'axe autoroutier, la ventilation simple flux ne permet pas de filtrer les particules, d'où les niveaux élevés en PM₁₀ et en PM_{2,5}. Pour le deuxième logement dépassant la valeur de l'OMS en PM_{2,5}, possédant pourtant une ventilation double flux, il serait intéressant de vérifier les filtres de la ventilation. Plus globalement on observe une corrélation entre le taux de renouvellement d'air de la ventilation et les concentrations de particules fines.
- Pour le Radon enfin : la ventilation après une rénovation joue un rôle important dans le maintien des concentrations en radon. En effet, sur les 7 logements présentant des concentrations moyennes supérieures à 100 Bq/m³, 5 logements sont équipés d'une ventilation simple flux. A contrario, même dans les zones où le risque radon est élevé, la ventilation double flux semble efficace pour limiter les concentrations en radon dans les logements. Ceci s'explique par le fait que la ventilation simple flux met les logements en dépression, ce qui aspire le radon du sol, ce qui n'est pas le cas en double flux (sous réserve d'un bon réglage des débits).

Satisfaction globale des ménages

96 % des répondants se déclarent plutôt ou entièrement satisfaits de leur rénovation et aucun ne s'est déclaré insatisfait de la rénovation performante de leur logement. C'est donc un retour globalement très positif sur la rénovation performante et les dispositifs d'accompagnement déployés sur les territoires (voir [1.5](#)).

Les résultats d'enquête traduisent aussi l'implication des ménages dans ces travaux de rénovation et leur montée en compétence à travers le suivi du chantier et l'apprentissage des nouveaux systèmes. Beaucoup se sont « pris au jeu » de la performance énergétique.

Les résultats sont donc très positifs sur l'ensemble des thématiques abordées : les ménages ont pu bénéficier de dispositifs d'accompagnement bien structurés, ils sont globalement satisfaits des rénovations effectuées, les performances énergétiques visées sont atteintes dans la très grande majorité des cas, le confort après rénovation est jugé globalement bon été comme hiver, la qualité d'air mesurée est globalement très bonne, et un plan de financement a pu être proposé aux ménages, qui leur a permis de réaliser ces travaux ambitieux.

Ces très bons résultats nous confortent dans notre conviction que, moyennant quelques améliorations dans les dispositifs d'accompagnement des ménages et de formation des acteurs, accompagnées du renforcement, du fléchage et de la simplification des financements, la rénovation complète et performante, est aujourd'hui prête à être massifiée pour répondre enfin aux enjeux écologiques et sociaux du 21^e siècle.

GLOSSAIRE

Boîte 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.

Cep : consommation d'énergie primaire sur 5 postes (chauffage, ECS, climatisation, éclairage et auxiliaires), principal indicateur de la définition du BBC.

COP : coefficient de performance d'une pompe à chaleur. C'est le rapport de la chaleur fournie à la maison à l'électricité consommée. Par exemple, un COP de 3 signifie qu'avec 1 kW.h d'électricité on produit 3 kW.h de chaleur pour la maison.

COV : composés organiques volatils, famille de polluants de l'air intérieur. Leur concentration s'exprime en ppm (parties par million) ou en ppb (partie par milliard). Voir [§9.2.1](#).

DJU : degrés-jours unifiés, exprimés en °C.j ou K.j (degré celsius ou degré kelvin x jour), ils expriment la rigueur de l'hiver. Plus les DJU sont élevés, plus l'hiver est froid. Voir le [§1.2.3](#).

ECS : eau chaude sanitaire.

ITE : isolation thermique par l'extérieur.

ITI : isolation thermique par l'intérieur.

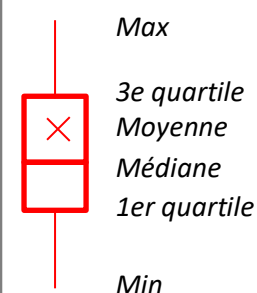
kW.h ou kWh : unité de mesure de l'énergie, le kilo watt-heure est l'énergie correspondant à une puissance d'un kilowatt utilisée pendant une heure. On notera **kW.h_{eu}** l'énergie utile (par exemple le besoin de chauffage), **kW.h_{ef}** l'énergie finale (l'énergie qu'on achète, celle mesurée au compteur électrique ou au compteur de gaz) et **kW.h_{ep}** l'énergie primaire (celle prélevée dans l'environnement, par exemple la chaleur utilisée dans une centrale électrique pour fabriquer l'électricité).

PAC : Pompe à chaleur.

PM : particules fines, famille de polluants de l'air intérieur. Leur concentration s'exprime en µg/m³ (microgrammes par mètre-cube d'air). Voir [§9.2.2](#).

Ubat : cet indicateur reflète la déperdition moyenne de l'ensemble des parois. Exprimé en W/m².K, il prend en compte les parois opaques, les menuiseries, mais aussi les ponts thermiques. En revanche il ne prend pas en compte les infiltrations d'air ni les déperditions liées à la ventilation. Ces déperditions sont rapportées à la somme des surfaces déperditives. Voir [§2.7](#).

Boire à moustache :



PRESENTATION GENERALE DES RENOVATIONS

Méthodologie : les données présentées dans cette partie ont principalement été collectées auprès des participants à l'aide d'un questionnaire en ligne. Il a été rempli par tous à l'exception des logements des opérations EnergieSprong de Picardie., soit 94 réponses collectées.

Pour la [partie 1.2](#) sur les maisons et leur environnement, ces informations ont été croisées et complétées par des données issues des documents mis à notre disposition notamment les documents de diagnostics. Ces informations complémentaires permettent de décrire les 106 maisons suivies au final.

Pour la [partie 1.5](#) portant sur les usages et la satisfaction des habitants, 10 entretiens semi-directifs ont été réalisés en amont, ce qui a permis d'intégrer au questionnaire mentionné précédemment des questions sur le sujet. Les enseignements quantitatifs sont ainsi basés sur les 91 réponses reçues.

1 Description de l'échantillon

1.1 Description des participants

1.1.1 Composition des foyers des participants

Les foyers de l'échantillon sont composés de **3,2 personnes en moyenne** ce qui est sensiblement plus élevé que la moyenne de la population française qui s'élève à 2,20. Il s'agit pour 63% d'entre eux de couples avec enfants.

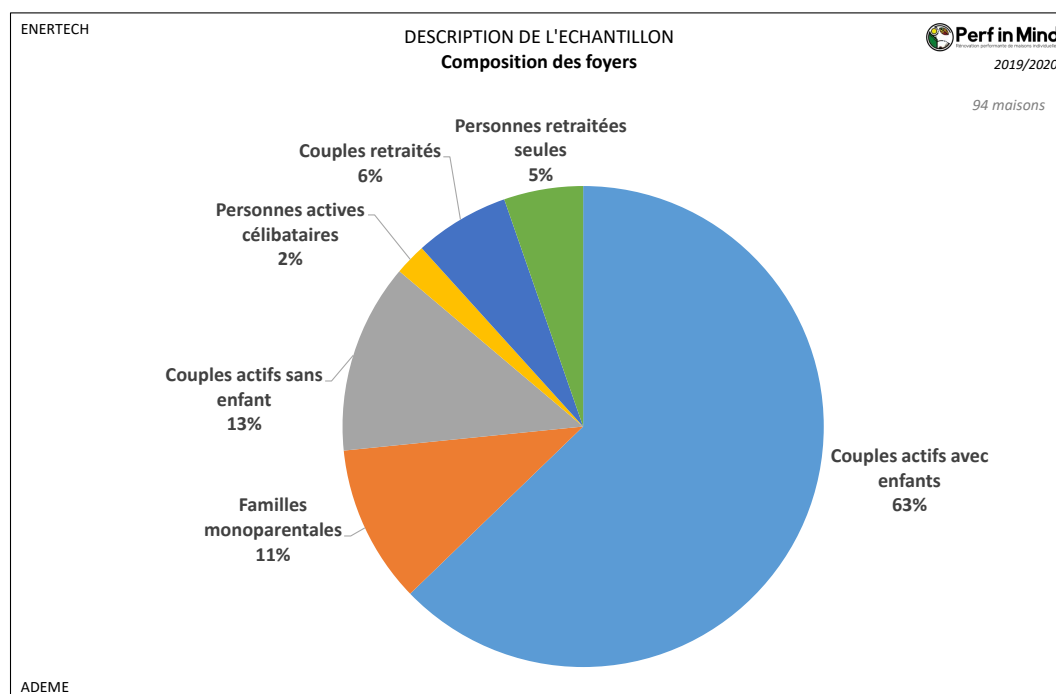


Figure 2 : Graphique de la composition des foyers.

A notre qu'en moyenne la surface des maisons est de 125 m² SHAB (voir [§1.2.5](#)). En moyenne, la densité d'occupation est de 45,8 m² par habitant.

1.1.2 Niveau de revenu

L'échantillon est réparti assez équitablement entre les différentes classes de revenu mensuel comprises entre 1 500 et 4 500 euros qui représentent 71% des foyers participants. Seuls 2% ont un revenu inférieur à 1 500 euros et 8% des ménages ont un revenu supérieur à 5 500 euros.

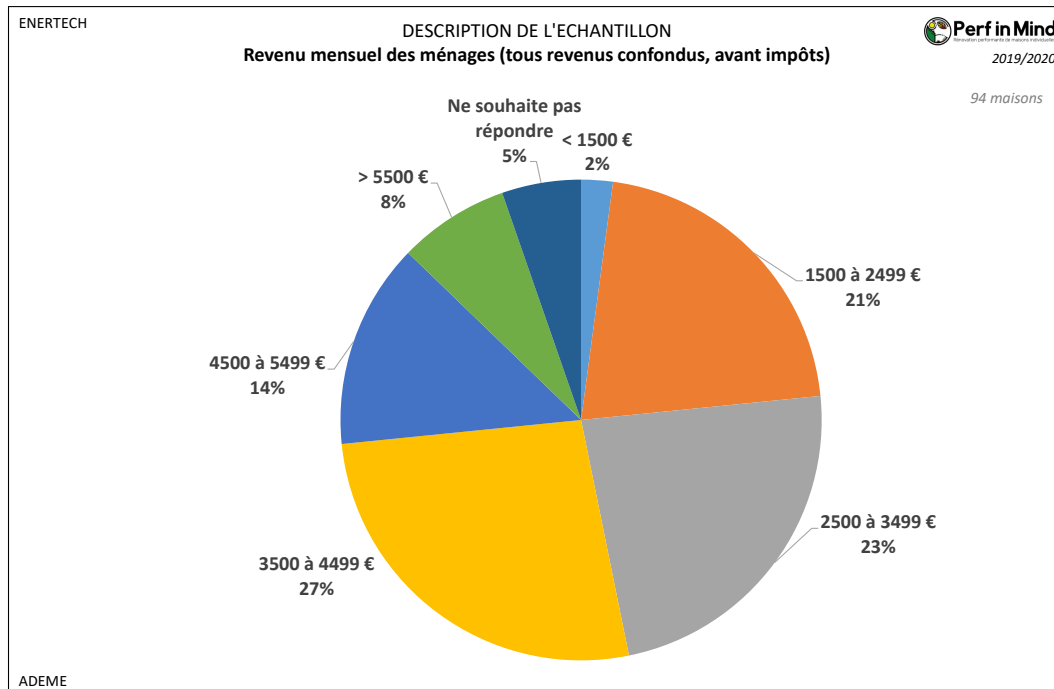


Figure 3 : Graphique des revenus mensuels des ménages.

1.1.3 Profession

La Figure 4 suivante montre les catégories professionnelles des répondants au questionnaire :

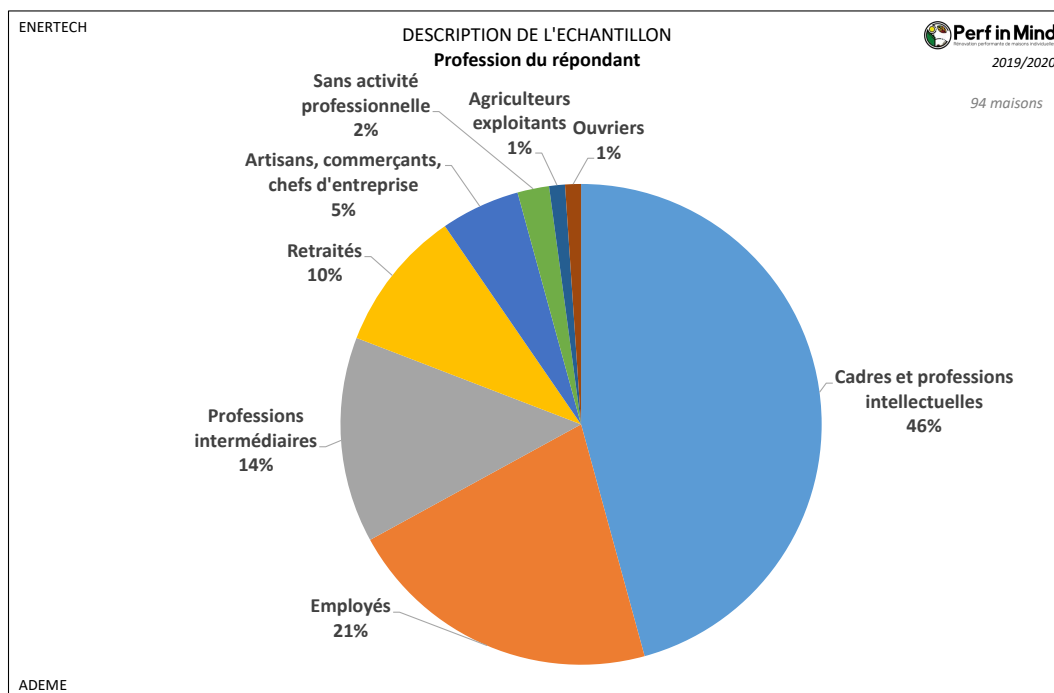


Figure 4 : Graphique des catégories professionnelles des répondants au questionnaire.

Plus de la moitié de l'échantillon est composé de cadres, professions intellectuelles, artisans, commerçants ou chefs d'entreprises (a minima le répondant du questionnaire). 35% sont des employés ou professions intermédiaires.

Les Cadres et professions intellectuelles sont sur-représentés par rapport à la population nationale, où ils représentent 20,4% en 2020, tandis que les ouvriers sont sous-représentés avec 1% contre 19,2% au niveau national (Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2489546>). NB : les chiffres INSEE sont rapportés à la population active, donc hors retraités et sans activité professionnelle.

On souligne que ce biais de représentation peut être lié au processus de recrutement des ménages suivis dans le cadre de l'étude, et ne reflète pas forcément la réalité sociologique des ménages réalisant des rénovations performantes.

1.1.4 Statut d'occupation avant travaux

Dans le cadre du questionnaire soumis aux participants, nous avons posé la question : « Habitez-vous la maison avant les travaux de rénovation ? ». Les réponses sont présentées dans le graphique suivant (90 réponses sur les 106 participants finaux) :

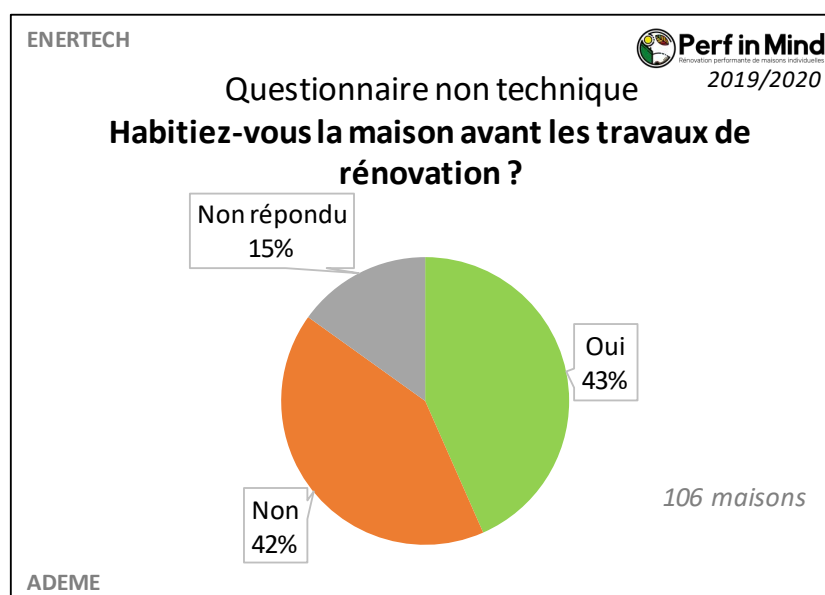


Figure 5 : Graphique des réponses des participants à la question « Habitez-vous la maison avant les travaux de rénovation ? ».

La moitié environ des travaux de rénovation suivis dans cette étude ont donc été réalisés dans le cadre d'un déménagement, qui constitue un contexte favorable à une rénovation complète.

On note cependant que la rénovation complète et performante est possible en site occupé, puisque l'autre moitié des rénovations sont dans ce cas.

1.2 Description des maisons et de leur environnement

1.2.1 Date de construction des maisons et procédé constructif

84% des maisons de l'échantillon ont été construites avant 1975 donc avant toute réglementation thermique, ce qui signifie qu'initialement elles n'étaient pas isolées.

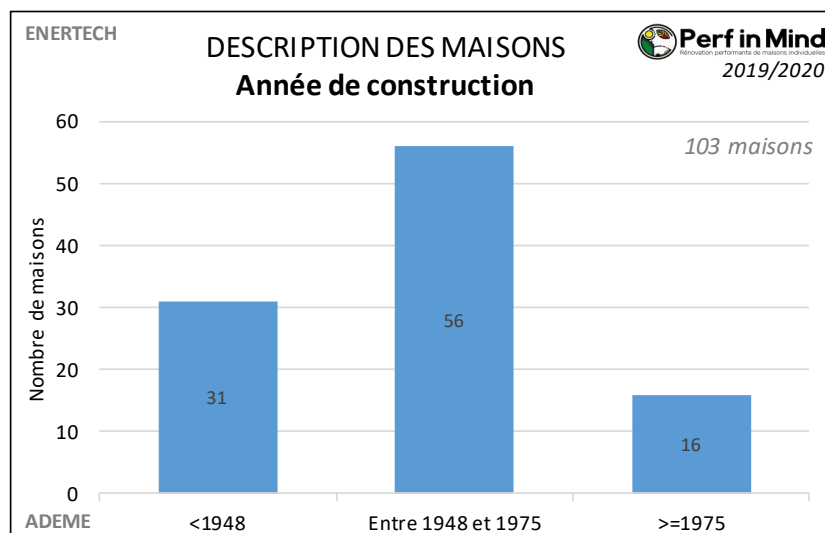


Figure 6 : Graphique de répartition des maisons par époque de construction.

30% des maisons ont été construites avant 1948, donc notamment avec des matériaux préindustriels qui ont pu impacter le choix du mode d'isolation et la nature des isolants notamment pour les murs (voir les [§2.1.1](#) et [2.1.2](#)).

Le mode constructif principal est précisé par les participants dans les questionnaires, que nous avons également croisé et complété avec les documents de diagnostics avant travaux et photos. A noter que certaines maisons regroupent plusieurs procédés constructifs, notamment dans le cas d'extension ou surélévation postérieures à la construction initiale. Nous avons conservé alors le mode constructif le plus ancien ou principal en termes de surfaces.

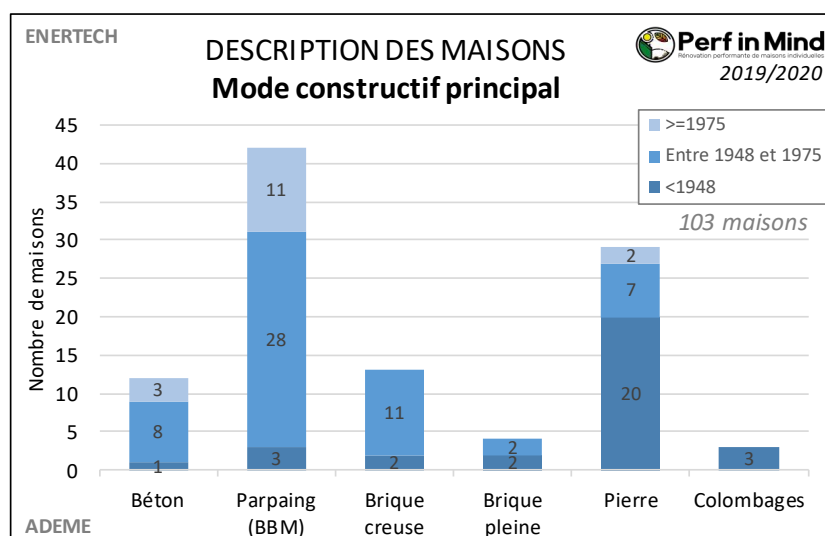


Figure 7 : Graphique des modes constructifs principaux des maisons, par époque de construction.

1.2.2 Localisation des opérations

Les 106 maisons suivies sont réparties dans 6 Régions et 19 Départements. Le tableau suivant présente le nombre de maison par Région, par Département et par type de suivi :

Région / département	Maisons en suivi « Avancé »	Maisons en suivi « Base »	Nombre total de maisons
AURA	4	21	25
7		3	3
26	4	6	10
38		4	4
69		5	5
73		3	3
BFC	7	4	11
25	7	3	10
90		1	1
CVDL	7		7
41	4		4
45	3		3
Grand Est	10	15	25
54	4	4	8
57	1	2	3
67	1	7	8
68	3	2	5
88	1		1
Hauts de France		12	12
80		12	12
NORMANDIE	10	16	26
14	4	7	11
50	5	6	11
61	1	1	2
76		2	2
Total général	38	68	106

Figure 8 : Tableau de la répartition des maisons suivies par Région, par Département et par niveau de suivi.

La carte suivante permet de situer l'ensemble des rénovations suivies :



Figure 9 : Localisation des maisons suivies sur la carte de France. Les suivis « Avancés » sont identifiés par une marque rouge, tandis que les suivis « Base » le sont par une marque jaune. Tous les projets ne sont pas visibles, une marque peut en cacher d'autres.

On note que le Sud-Ouest et le pourtour méditerranéen ne sont pas représentés dans l'échantillon de logements suivis.

1.2.3 Climat

La zone climatique telle que définie au sens de la réglementation thermique et l'altitude influent à la fois sur la définition du niveau de performance BBC rénovation et sur la consommation de chauffage des maisons. Le tableau suivant présente la répartition des maisons par zone climatique et par tranche d'altitude :

Zone climatique	Altitude ≤ 400m	Altitude de 400 à 800m	Altitude > 800m	Total
H1a	15			15
H1b	28			28
H1c	33		2	35
H2a	11			11
H2b	4			4
H2d	12	1		13
Total général	103	1	2	106

Figure 10 : Tableau de répartition des maisons par zone climatique et par tranche d'altitude.

En cohérence avec la carte des projets, on note que les zones climatiques H2c et H3 ne sont pas représentées. Ceci aura un impact sur les conclusions de l'analyse du confort d'été au §8.2.

Afin de caractériser le climat des maisons pendant la période de mesure on peut comparer les Degré-Jours Unifiés (DJU) des fichiers météorologiques des maisons aux données météorologiques normatives. Les DJU sont la somme, pour chaque jour de l'année, de l'écart entre la température extérieure moyenne et une température intérieure de référence, généralement 18°C. On quantifie ainsi la rigueur de l'hiver : plus les DJU sont élevés, plus l'hiver est froid et donc le besoin de chauffage élevé.

Nous allons comparer ici 3 fichiers météo :

- Les **fichiers météo « standards »** issus de Météonorm³ reflètent les données moyennes trentennales, pour les stations météo de référence des zones climatiques concernées.
- Les **fichiers météo des stations les plus proches des projets, et pour la période de mesure** (du printemps 2019 au printemps 2020). Ces données sont issues de MeteoCiel⁴ pour la plupart (25 fichiers météo, couvrant 82 maisons) et certaines ont été extrapolées à partir des DJU mensuels d'InfoClimat⁵ (5 fichiers météo, concernant 24 maisons en suivi « base »).
- Afin de gagner encore en précision, **l'altitude a été adaptée à chaque projet**, en prenant en compte 0,6°C de moins par 100 m d'altitude entre la base météo et chacune des maisons. Le fichier météo est ainsi adapté individuellement à chaque maison, ainsi que la valeur de DJU présentée ci-après.

Zone climatique	Nombre de maison dans cette zone	Station météo de référence de la zone	Fichier météo standard de la zone	Météos réelles de la station météo la proche du projet, pour la période de mesure			Météos réelles de la station météo la proche du projet, pour la période de mesure, et corrigée de l'altitude		
			DJU	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
H1a	15	Trappes	2551	2266	2312	2374	2266	2340	2598
H1b	28	Nancy	2706	2215	2499	2749	2215	2474	2772
H1c	35	Macon	2511	1941	2384	2708	1896	2357	3647
H2a	11	Rennes	2257	2098	2204	2308	2098	2250	2451
H2b	4	La Rochelle	1925	2229	2229	2229	2180	2230	2281
H2d	13	Carpentras	1913	1744	1952	2091	1744	2036	2579

Figure 11 : Tableau de comparaison par zone climatique des DJU du fichier météo standard de la station de référence, avec la valeur minimale, moyenne et maximale des DJU des fichiers météo les plus proches des maisons, pour la période de mesure, non corrigé de l'altitude puis corrigé de l'altitude.

Le graphique ci-dessous présente les mêmes données sous forme visuelle :

³ <https://meteonorm.com/>

⁴ <https://www.meteociel.fr/>

⁵ <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2020/trappes/valeurs/07145.html>

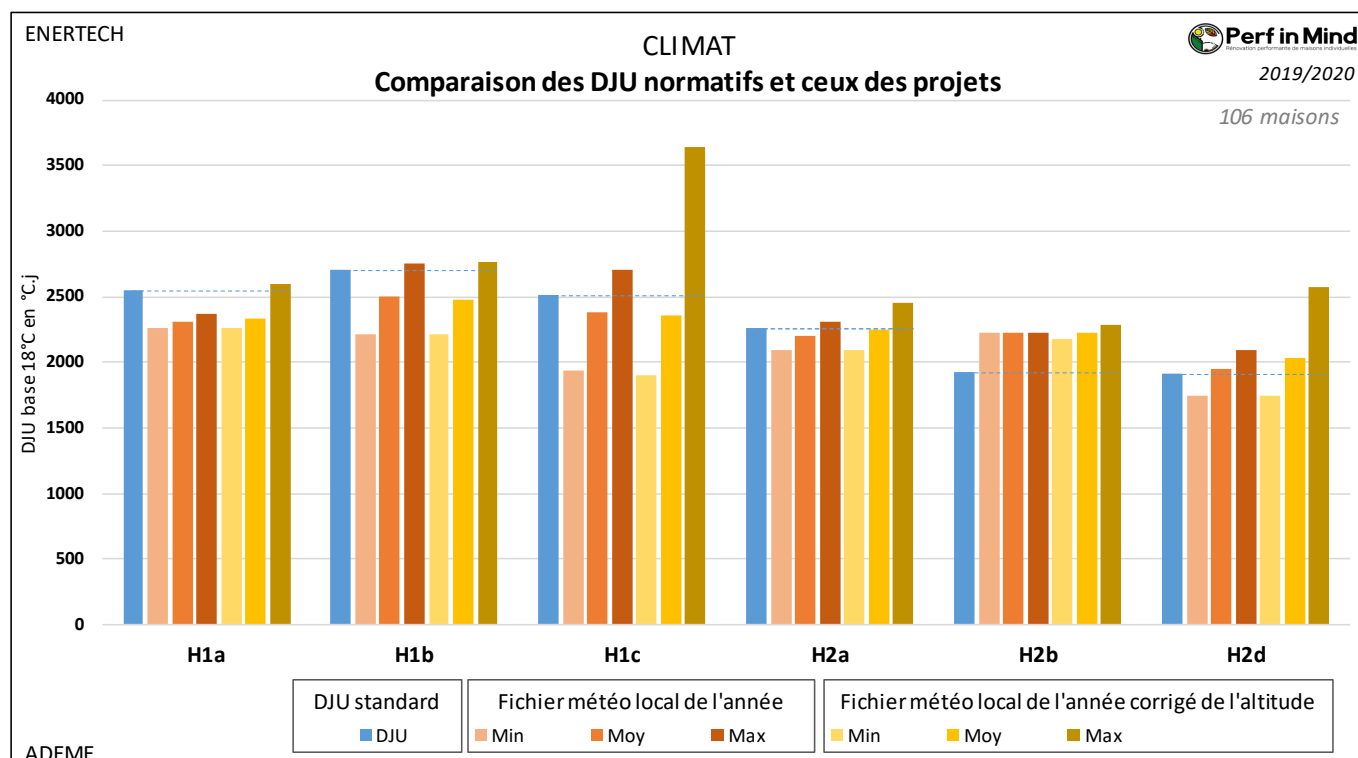


Figure 12 : Graphique de comparaison par zone climatique des DJU du fichier météo standard de la station de référence, avec la valeur minimale, moyenne et maximale des DJU des fichiers météo les plus proches des maisons, pour la période de mesure, non corrigé de l'altitude puis corrigé de l'altitude.

On note que de façon générale la période de mesure a été moins froide que les données de référence pour les 4 zones climatiques H1a, H1b, H1c et H2a (la moyenne des DJU est inférieure aux DJU de référence), alors que pour les 2 zones H2b et H2d la période de mesure a au contraire été plus froide que la moyenne.

On note aussi l'importance de la correction avec l'altitude, notamment pour les 2 projets situés en zone H1c à plus de 800m d'altitude, pour lesquels les DJU dépassent 3000°C.j.

1.2.4 Environnement des maisons

Pour les maisons en suivi « avancé », nous avons relevé les masques solaires à chacune des menuiseries, avec ses dimensions et son orientation. Ces informations ont permis de rendre plus précis le calcul du besoin de chauffage (voir [§4.3](#)).

Les masques solaires ont été qualifiés de 1 (pas de masque solaire) à 3 (masque solaire important). La traduction en pourcentage d'occultation est réalisée avec des hypothèses variable, un masque solaire important (valeur 3) pouvant correspondre à une occultation de 50 à 90%.

Le graphique suivant présente les statistiques sur les masques solaires moyens toutes orientations confondues, par maison :

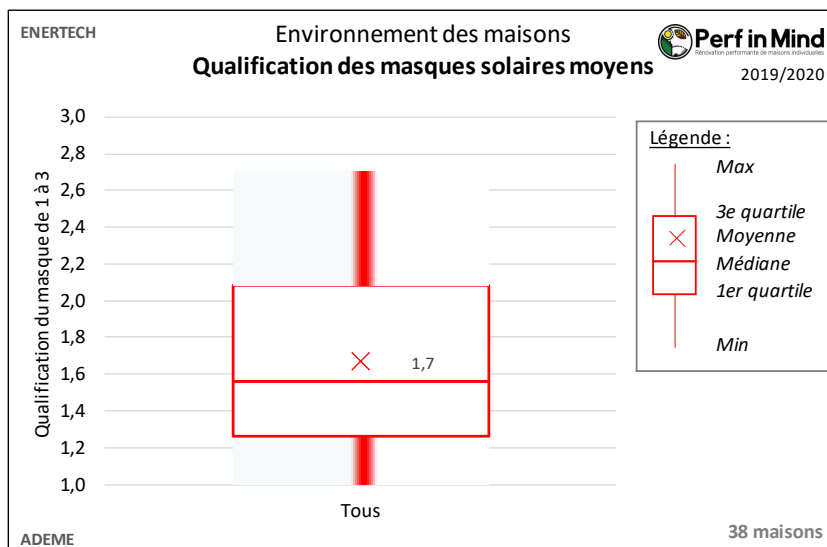


Figure 13 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la qualification des masques solaires moyens des maisons de 1 (pas de masque solaire) à 3 (masque solaire important).

Les masques solaires relevés sur les 38 maisons du suivi « avancé » varient ainsi de 1 à 2,7, avec une moyenne de 1,7 (soit un taux d'occultation variable de 17 à 30%).

1.2.5 Surface

Environ la moitié des maisons a une surface comprise entre 80 et 120m². La surface moyenne vaut 125m² et la médiane 118m².

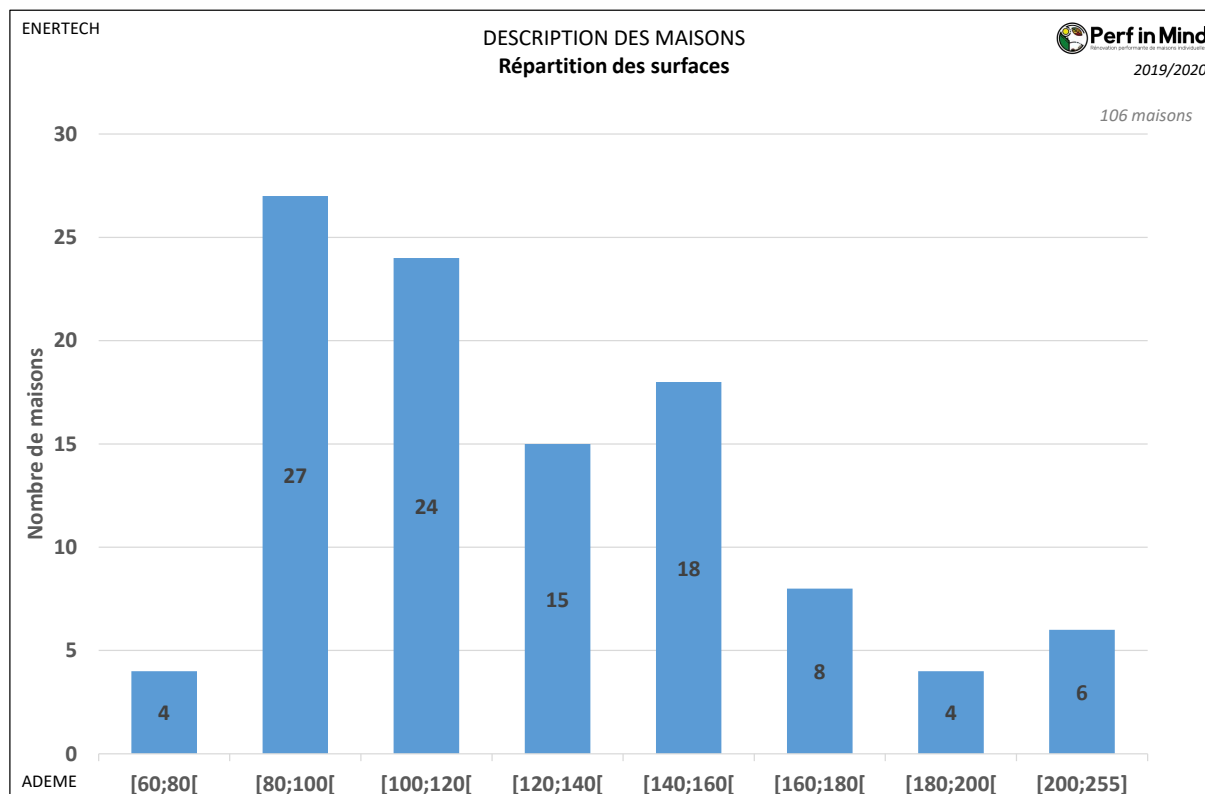


Figure 14 : Graphique de répartition des surfaces habitables des maisons.

Ces valeurs sont supérieures à la moyenne nationale dans l'habitat individuel qui s'élève à 112m² (INSEE 2013).

1.2.6 Nombre de niveaux chauffés et compacité

Le nombre de niveaux chauffés des maisons suivies varie de 1 à 4. Le nombre de maisons par nombre de niveau chauffé est présenté sur le graphique suivant :

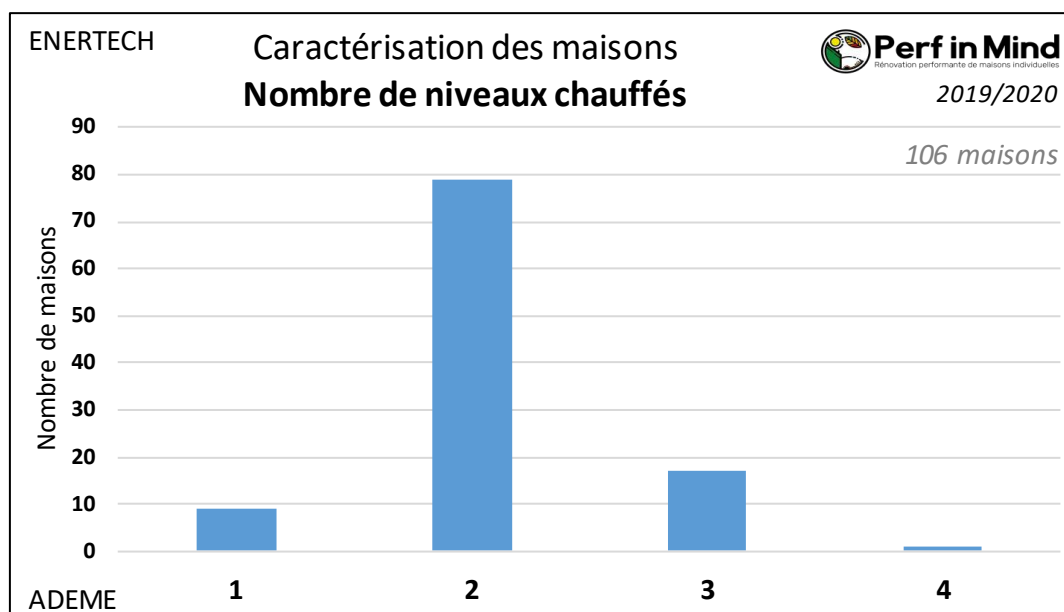


Figure 15 : Graphique du nombre de maisons suivies par nombre de niveaux chauffés.

On constate que la grande majorité des maisons suivies disposent de deux niveaux chauffés. Il faut cependant souligner que bien souvent la surface des deux niveaux chauffés est différente, soit que l'étage est d'une surface plus petite, soit que la partie chauffée du rez-de-chaussée soit restreinte, laissant la place à des pièces non chauffées (garage, cave etc.).

La forme de la maison joue un rôle important dans la performance thermique. En effet, pour un service rendu donné, par exemple pour une certaine surface habitable, la maison peut avoir plus ou moins de surfaces de contact avec l'extérieur.

On peut refléter cela par un indicateur de **compacité**. Il en existe plusieurs, nous avons choisi de présenter ici le rapport de la surface déperditive totale de la maison (plancher bas inclus) à la surface habitable (SHAB). Plus cette valeur est élevée, plus il y a de surfaces déperditives, et moins la maison est compacte.

Cette grandeur est présentée dans le graphique ci-dessous pour l'ensemble des maisons dont nous avons pu reconstituer les métrés (103 maisons sur 106), et par nombre de niveaux chauffés (la maison sur 4 niveaux fait partie de celles pour lesquelles nous n'avons pas pu fiabiliser les métrés) :

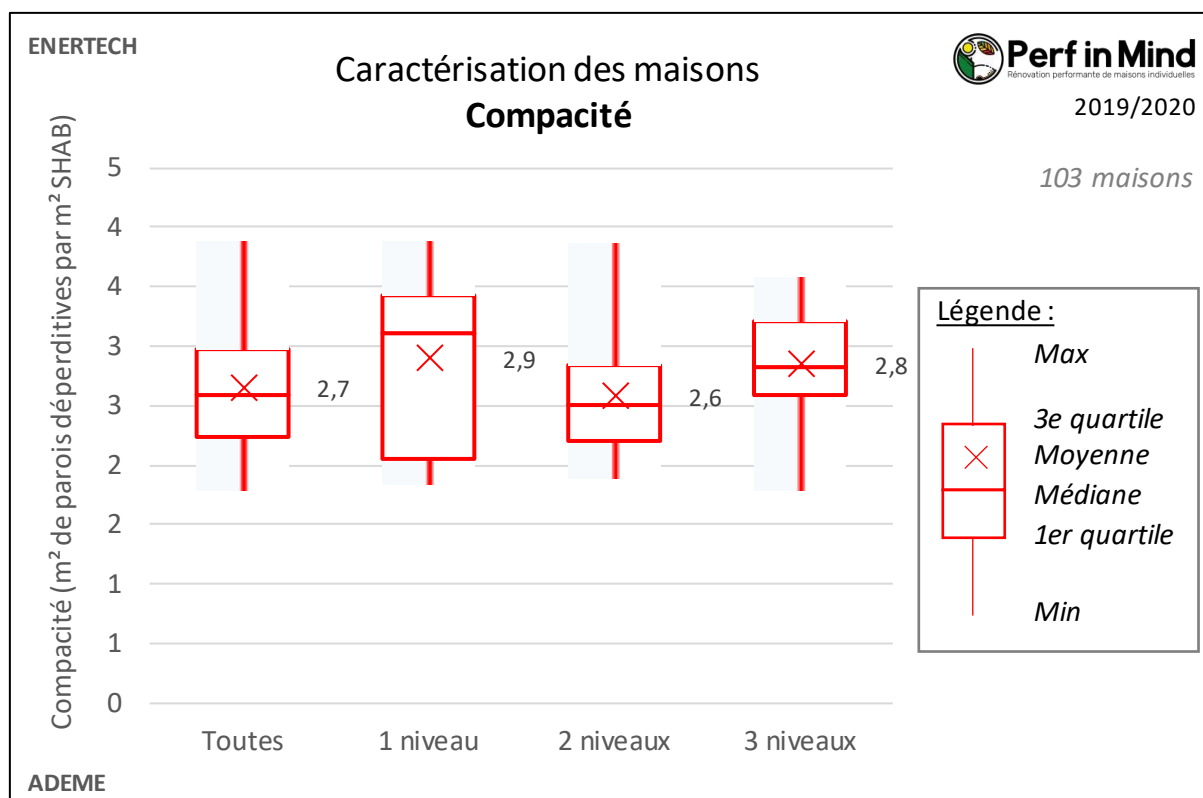


Figure 16 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la compacité de l'ensemble des maisons, et par nombre de niveaux chauffés.

La compacité moyenne de l'ensemble des maisons est de $2,7 \text{ m}^2$ déperditifs par m^2 SHAB.

Cette valeur est comparable à celle de l'Observatoire BBC d'Effinergie, qui constate $2,1 \text{ m}^2$ déperditifs par m^2 SHON. Le rapport SHON/SHAB étant généralement de l'ordre de 1,2, cette valeur est équivalente à un ratio de $2,5 \text{ m}^2$ déperditifs par m^2 SHAB. Les maisons suivies ici sont donc légèrement moins compactes que la moyenne de l'Observatoire BBC.

La distinction par nombre de niveau permet de voir que de façon logique les maisons de plain pieds sont globalement moins compactes que les maisons à étages.

1.3 Accompagnement de la rénovation

1.3.1 Type d'accompagnement dont a bénéficié le ménage

Les rénovations suivies ont toutes bénéficié d'un accompagnement à la rénovation performante. Différents dispositifs publics régionaux et locaux sont représentés, ainsi qu'un dispositif privé présents sur différents territoires en partenariat avec les collectivités territoriales.

Le tableau suivant présente une cartographie des maisons par dispositif dont les ménages ont bénéficié, et par Région :

Dispositifs \ Régions	AURA	BFC	CVDL	Grand Est	Normandie	Hauts de France	Total par dispositif
Dorémi	17						17
Mur Mur (Grenoble)	4						4
ASDER (Savoie)	3						3
Ecoréno'v (Grand Lyon)	1						1
Effilogis		11					11
Ma Maison Eco			5				5
Ma Maison Eco + Dorémi			1				1
Dorémi			1				1
OKTAVE / Dorémi				13			13
CCE				12			12
Chèque Eco					26		26
EnergieSprong						12	12
Total par Région	25	11	7	25	26	12	106

Figure 17 : Tableau du nombre de maison suivies ayant bénéficié des différents dispositifs d'accompagnement à la rénovation performante représentés, par Région.

La suite de ce chapitre présente, pour chaque dispositif, les modes d'organisations, les prescriptions techniques et les types d'accompagnements qui pourraient expliquer les succès ou axes d'améliorations constatés lors du retour d'expérience réalisés après la phase d'instrumentation

❖ Le chèque Eco-Energie en Région Normandie

Dispositif :



Région :



Cette démarche, accompagne les particuliers depuis 2009 dans les démarches de rénovation performante. Elle s'articule autour de **3 pôles** fondamentaux :

- Le « conseil et l'audit » auprès des particuliers,
- Les « travaux » avec le métier de rénovateur BBC et les 4000 entreprises RGE,
- Le « financement » avec la participation des organismes bancaires.

Définition de la rénovation performante

Le niveau BBC pris en compte dans le dispositif régional est conforme au référentiel de l'association Effinergie.

Les clés du succès

Le chèque éco-énergie cible les propriétaires occupants et bailleurs, sous conditions de ressources pour les travaux, porteurs d'un projet de rénovation pour une maison de plus de 15 ans. Il offre la possibilité de bénéficier :

- D'un **conseil gratuit** auprès des Espaces Info Energies (EIE) ou des opérateurs ANAH en amont d'un audit énergétique, appelés conseillers Habitat & Energie.
- D'une **aide financière**, chèque « audit énergétique et scénarios », pour la réalisation **d'un audit complet** ou **d'une étude thermique** du bâtiment qui doit répondre aux critères techniques d'éligibilités « BBC compatibles ». Ces audits ou évaluations thermiques sont définis par un **cahier des charges** et réalisés par des professionnels **conventionnés** avec la Région. Le cahier des charges de l'audit propose une **feuille de route** pour une rénovation BBC (globale ou par étapes) et a pour vocation à apporter « au particulier les éléments essentiels à sa prise de décision afin de faciliter le passage à l'acte vers une rénovation globale »⁶. Les étapes pour le réaliser sont :
 - o **Collecte** d'information auprès du particulier (motivations, factures, plans, ...),
 - o **Visite** et identification des **pathologies** in situ,
 - o Publication d'un **rapport d'audit** contenant l'étude thermique (RT Ex), des propositions de travaux, identification des points de vigilance, une estimation des coûts par postes, des recommandations sur la mise en œuvre, les ponts thermiques, la migration de vapeur d'eau...
 - o **Présentation et explication** des résultats au domicile du maître d'ouvrage ou dans les locaux des conseillers Habitat et Energie qui pourront l'accompagner dans l'élaboration de son plan de financement,
 - o Communication des données de l'audit sur une plateforme régionale.
- Par ailleurs, l'auditeur a la double obligation de présenter son rapport d'audit lors de la **réunion de chantier avant travaux**, organisée sous l'égide du rénovateur BBC, afin d'assurer le lien entre les différents acteurs, et de le mettre à jour en fin de chantier.
- D'une **aide financière** pour la **réalisation des travaux**, sous certaines conditions :
 - o Les **devis**, contrôlés par les conseillers Habitat et Energie, doivent répondre à un **cahier des charges** précis,
 - o Les travaux doivent être réalisés dans les deux ans suivant l'audit et par des entreprises **RGE à minima**,
 - o La présence d'un **rénovateur BBC** est obligatoire. Issu d'une convention entre différents partenaires (Région, FFB, CAPEB, Fédération Ouest des SCOP BTP et le Conseil régional de l'Ordre des Architectes de Basse Normandie) signée en 2011, le métier de « rénovateur BBC » permet d'accompagner le particulier dans son parcours de rénovation. Ses missions sont définies dans un cahier des charges :

⁶ Extrait du Cahier des charges « Audit Energétique et scénarios »

- Assurer le lien et la coordination entre les différents acteurs de la chaîne de confiance : auditeurs, conseiller Habitat et Energie, entreprises RGE, maître d'ouvrage
 - Organiser une réunion avant les travaux
 - Assurer les contrôles en fin de chantier sur le système de ventilation et de s'assurer que le test d'étanchéité à l'air a été réalisé à réception
- **De bénéficier d'un partenariat bancaire** qui a pour objectifs de lever les freins financiers à la rénovation performante à savoir la réception d'une avance de financement des travaux, la prise en compte de la réduction de la facture énergétique dans la capacité de remboursement des ménages, et un accès facilité à l'éco-prêt à taux zéro. Enfin, la Région Normandie accompagne les particuliers dans la valorisation des Certificat d'Economies d'Energie (CEE) au travers d'un partenariat avec un acteur privé.

❖ Je rénove BBC et Oktave en Région Grand Est

Dispositif :



Région :



Le guichet unique Oktave, porté par la Région Grand Est, fait suite aux dispositifs « Programme Energivie » lancé en 2003, « 50 chantiers pionniers de rénovations thermiques de maisons individuelles » dans le cadre d'une convention entre la Région Alsace et EDF en 2008, et « Je rénove BBC » lancé en 2010 dans le cadre d'une convention entre la Région Alsace, EDF et Électricité de Strasbourg (ES). Ce service indépendant propose un suivi et un accompagnement pour des projets de rénovations énergétiques complètes ou par étapes. Il est animé par des plateformes locales. Il propose :

- Du conseil (technique, analyse de devis, ...) grâce aux conseillers Oktave,
- Un scénario de travaux,
- La mise en relation avec un ou plusieurs groupements d'artisans,
- Une solution de financement personnalisée,
- Un suivi des travaux par le conseiller Oktave et le pilote du groupement d'artisans.

Définition de la rénovation performante

Dans le cadre du programme « Je rénove BBC », le dispositif avait pour objectifs d'accompagner les professionnels au niveau BBC, ie avec des consommations énergétiques inférieurs à 104 kW.h_{ep}/m²/an.

Les clés du succès

Le programme « Je Rénove BBC » proposait pour les propriétaires occupants ou bailleurs d'une maison achevée avant le 10 mai 2005, les aides suivantes :

- Une **aide à la maîtrise d'œuvre**. Elle s'élevait à 50% des frais d'accompagnement thermique plafonnés à 3000 € (25% EDF et 25% Région). Les missions de ce prestataire étaient définies dans le règlement du programme « Je rénove BBC » et dans un acte d'engagement. Il devait
 - o Accompagner le particulier en amont en réalisant un **projet de rénovation thermique** incluant des volets techniques et financier conformes à un référentiel technique. Il qui décrivait des obligations générales de performance et de mise en œuvre concernant les caractéristiques des produits pour l'isolation des parois (ACERMI, avis technique du CSTB...), le traitement des isolations des maisons en fonction de leur architecture (colombages, maçonnerie ou béton, ossature bois, ...), le traitement des dalles inférieures et des toitures, la ventilation, le chauffage et l'ECS, le traitement de l'étanchéité à l'air...
 - o Aider le particulier à sélectionner les entreprises,
 - o Informer le particulier des obligations contractuelles du programme « Je rénove BBC » (acte d'engagement, cession des CEE, ...),
 - o Formuler une proposition chiffrée mentionnant les travaux à réaliser pour chaque lot.
 - o Fournir un planning prévisionnel.
- Une **aide aux travaux** à hauteur de 5000 € pour la rénovation des maisons individuelles, avec une aide complémentaire de 35€/m² pour l'usage de matériaux à base de fibres végétales ou animales. Durant la phase de travaux, le prestataire (maître d'œuvre) s'engageait à :
 - o Fournir ses attestations d'assurances professionnelles
 - o Assurer la coordination des travaux
 - o Faire réaliser ou réaliser les travaux dans les règles de l'art
 - o Sensibiliser les acteurs sur les enjeux et l'atteinte des objectifs d'étanchéité à l'air
 - o Faire réaliser un test d'étanchéité à l'air en fin de travaux par un bureau de contrôle certifié.
 - o Atteindre un niveau de performance, conforme aux exigences définies dans le référentiel technique ou l'étude thermique, contrôlé de manière inopinée par un organisme lors du déroulement des travaux
 - o A fournir les factures acquittées dont les éléments à mentionner sont définis par le règlement du programme « Je rénove BBC »
 - o Assister le particulier à la réception des travaux pour l'obtention des attestations de fin de travaux clients et professionnels par lots

Après plusieurs années d'expérimentation, le programme « Je rénove BBC » a permis d'identifier plusieurs freins et de proposer une nouvelle organisation avec la création d'Oktave :

- D'un point de vue « organisationnel » : les différents acteurs sollicités par le particulier dans son parcours de rénovation se limitent à un **interlocuteur unique à chaque étape du projet**.
- D'un point de vue « technique » : une **Solution Technique de Référence (STR)**, sélectionnée parmi 10 bouquets de travaux prédéfinis suite à une visite architecturale et technique, vient remplacer la réalisation des études thermiques. Chaque STR fixe un niveau de performance pour les différents postes mais ne préconise pas de matériaux, matériels et ne fixent pas de préconisations de mise en œuvre. Des dérogations sont possibles dans deux cas précis (installation d'une simple flux et conservation des menuiseries) mais impliquent la signature d'une décharge par le particulier sur les risques de pathologies, de qualité sanitaire, d'inconfort et d'économie d'énergie.
- D'un point de vue de « l'accompagnement » : l'accompagnement réalisé par les maîtres d'œuvres est remplacé par des **conseillers Oktave** en amont (premier contact, rendez-vous d'information) et en aval (appropriation de la maison et suivi consommation post travaux). En parallèle, les

travaux sont réalisés par des groupements d'entreprises formés à la **démarche DOREMI et labellisées RGE**.

- D'un point de vue « financier » : Oktave élabore le **dossier de financement**, mais ne propose aucune aide financière à la rénovation.

❖ Le programme Effilogis de la Région Bourgogne Franche Comté

Dispositif :



Région :



Depuis 2006, la Région Bourgogne Franche Comté et l'ADEME encouragent le déploiement de la rénovation basse consommation au travers du programme **Effilogis**, et la création **du Service Public de l'Efficacité Energétique (SPEE)** qui ont pour objectifs d'accompagner, sous conditions de ressources, les propriétaires occupants ou usufruitiers de maisons individuelles qui souhaitent mettre en œuvre une rénovation basse consommation de leur logement. Il s'organise en 4 temps :

- Proposer un conseil de premier niveau à tous les publics et tous les projets auprès des EIE
- Réaliser un audit énergétique pour déterminer une feuille de route technique et financière sur mesure (plan de financement)
- Accompagner le particulier d'un point de vue technique et financier
- Réaliser un suivi post-travaux pour garantir le résultat.

Définition de la rénovation performante

Le niveau BBC pris en compte dans le dispositif régional est conforme au référentiel de l'association Effinergie, à l'exception de la production locale d'électricité renouvelable éventuelle qui n'est pas prise en compte dans les niveaux de performance énergétique.

Les clés du succès

Le SPEE de la Région Bourgogne Franche Comté propose un parcours aux particuliers qui se décompose en :

- Un **conseil gratuit** auprès des Espaces Info Energie (EIE), portes d'entrées pour les propriétaires afin de recevoir de l'information sur l'isolation, le chauffage, les énergies renouvelables, Ce conseiller propose un accompagnement pour la constitution du dossier d'aides financières. En parallèle, le particulier peut bénéficier d'un appui par un opérateur du programme « Habiter Mieux » de l'ANAH.
- Une **aide financière** pour la conception et le suivi de projet qui couvre :
 - o La réalisation d'un *audit énergétique* par des *BET conventionnés* avec la Région. Cet audit, dont l'architecture est définie dans un cahier des charges fourni par la Région, doit proposer un feuille route technique et financière permettant d'atteindre le niveau BBC. Il fait suite à une visite du logement et se compose d'une vingtaine de page. Il intègre les éléments suivants :

- Les objectifs de l'audit
- Le descriptif du bâtiment
- Les consommations énergétiques avant et après travaux issues du moteur de calcul Th-C-E ex
- Des propositions d'améliorations pour une rénovation BBC avec une hiérarchisation des travaux, les coûts par postes (fournitures et pose), des informations sur les caractéristiques techniques des matériaux et équipements préconisés
- Une synthèse du scénario BBC sur 2 pages
- Une conclusion sur la faisabilité technique et financière
- Une annexe présentant le parcours de rénovation dans la globalité
- Une étude réglementaire du projet, proposé le cas échéant par le BET.
- L'audit est subventionné à hauteur de 550 € TTC par la Région Bourgogne Franche Comté, laissant un reste à charge au particulier de 150 € TTC.
- Le recours à un **prestataire conventionné** avec la Région pour des **missions d'AMO ou de MOE**. Les missions de ce prestataire sont définies dans un cahier des charges. Elle débute avant les travaux au stade des devis d'entreprises pour finir à la réception des travaux
 - o Prise en compte de l'audit énergétique et des aides régionales
 - o Relecture des devis des entreprises
 - o Accompagnement pour la mise en conformité des devis avec les objectifs du projet
 - o Assistance auprès de la région (dépôt des informations techniques et des devis sur la plateforme numérique, réponses aux questions)
 - o Aide à la préparation du chantier
 - o Participation à la réunion de lancement
 - o Aide à la coordination des entreprises de travaux
 - o 2 visites de chantiers à minima accompagnés de conseil
 - o Vérification de la qualité de mise en œuvre des matériaux et systèmes
 - o Réception des travaux.
- La réalisation des tests d'étanchéité à l'air avant travaux, en cours de chantier et à réception,
- Cette aide peut couvrir 80% des coûts relatifs aux missions définies ci-dessus, plafonnée à 3000 € TTC.
- Une **aide financière forfaitaire** de 5 000 €, bonifiée de 1 000 € en cas d'utilisation d'éco-matériaux, pour les travaux de rénovations sur une assiette de dépenses retenues. Ces travaux devront être **conformes à des exigences précises** définies dans un **cahier des charges techniques**. Il exclut d'office les projets portant uniquement sur les systèmes et les menuiseries. Il mentionne l'obligation d'une intervention sur les parois opaques et des contraintes techniques.

❖ Ma maison Eco Energie de la Région Centre Val de Loire

Dispositif :



Région :



Face aux enjeux énergétiques et environnementaux, la Région Centre Val de Loire et l'ADEME ont lancé depuis 11 ans le concours « Ma Maison Eco ». Il s'inscrit dans la « palette d'outils incitatifs et d'accompagnement visant à médiatiser, récompenser et promouvoir les initiatives de rénovation ». Ce concours est ouvert à tous particuliers propriétaires et aux SCIs. Les travaux peuvent être réalisés en une étape ou par étapes sous conditions.

Définition de la rénovation performante

Le niveau de rénovation « performante » pris en compte correspond aux labels BBC Effinergie rénovation, EnerPHit© et Minergie bâtiment modernisé. En parallèle, les maisons rénovées selon la démarche DOREMI sont aussi éligibles. Le dispositif impose la mise en œuvre de matériaux biosourcés sur au moins un poste de travaux de l'enveloppe et la présence à minima d'un équipement valorisant les énergies renouvelables.

Les clés du succès

La Région Centre Val de Loire impose la présence

- D'un **cadre juridique sécurisé** avec la signature de contrat de maîtrise d'œuvre en mission complète, conception et réalisation.
- D'un **conseil gratuit** auprès des Espaces Info Energie (EIE), afin d'obtenir un conseil sur le projet et obtenir un diaporama de synthèse vierge de candidature à compléter par le MO.
- D'un **dossier de candidature** composé de :
 - o Diaporama de synthèse du projet avec les visuels réalisés avec le support de l'EIE,
 - o Une étude thermique et/ou énergétique accompagné d'un fichier XML,
 - o Une note de calcul énergétique et de dimensionnement, la certification NF pompe à chaleur, un plan de localisation des ouvrages géothermiques pour la géothermie,
 - o Devis pour les travaux relatifs à l'amélioration de la performance énergétique

Elle propose en regard :

- Une **aide financière** de 5 000 € si le projet respecte la réalisation de(s) test(s) d'étanchéité à l'air prévue, la mise en œuvre de matériaux biosourcés et de l'instrumentation/suivi énergétique prévu. Un article dans le règlement définit le contenu de ce suivi.

- Un **bonus de 3 000 €** si le projet intègre les exigences précédentes à minima, une provenance locale des entreprises et artisans, une optimisation des coûts de rénovation et une attention particulière à la biodiversité.
- Un **bonus de 3000 €** dans le cadre d'une démarche de labellisation.
- Un **bonus de 5 000 €** en cas de géothermie, accompagné d'un second bonus de 5 000 € si la géothermie est performante (émission de chaleur très basse température, géocooling...)

❖ Le Contrat Climat Energie de la Région Lorraine

Dispositif :



Région :



Le dispositif **Contrat Climat Energie** (CCE) à l'initiative de la Région ex-Lorraine avait pour objectifs de « faciliter la rénovation BBC des maisons individuelles en proposant un accompagnement pédagogique individualisé et en démontrant la faisabilité technique et l'intérêt économique d'une rénovation performante ».

Définition de la rénovation performante

La notion de rénovation BBC pris en compte dans le CCE était conforme aux exigences du label BBC Effinergie rénovation.

Les clés du succès

Le dispositif se caractérisait par une forte volonté de responsabiliser le particulier en l'intégrant au cœur du projet de rénovation et en donnant du sens à l'accompagnement proposé. Comme en région Bourgogne Franche Comté, afin de sécuriser le parcours d'accompagnement et d'atteindre les objectifs, le CCE imposait le recours à l'assistance à la maîtrise d'ouvrage (AMO) ou la MOE. Le dispositif s'articulait autour :

- D'un **conseil gratuit** durant toutes les phases du projet (Informé, Concevoir, Réaliser les travaux, Bien Utiliser) auprès du Conseiller Info Energie (CIE),
- D'un **accompagnement financier** pour la réalisation d'un audit énergétique du logement. Le montant de l'aide était de 80% du coût en € TTC, dans la limite de 800 € à 1400 € suivant la réalisation ou pas d'un test d'étanchéité à l'air et l'éligibilité au programme « Habiter Mieux ». Cet audit était réalisé par un **bureau d'études thermiques** figurant sur un **annuaire** mis à disposition par Lorraine Qualité Environnement (Annuaire QECB). Il était réalisé sur la base d'un **cahier des charges**, fourni par la Direction de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, qui intégrait les exigences suivantes :

- o Visite obligatoire sur site
- o Description et analyse critique du logement
- o Réalisation d'un test d'étanchéité à l'air avant travaux afin de sensibiliser les propriétaires (confort et consommation)
- o Calcul des indicateurs de performance énergétique (Ubat, Cep, déperditions et puissance chauffage) suivant des modalités prédéfinies (méthode Th-C-E ex, norme NF EN 12-831)
- o La communication d'un projet de rénovation BBC composé
 - D'un traitement de l'enveloppe et du système de rénovation avec au moins 2 scénarios (les R, U, équipements et coûts mentionnés)
 - D'un traitement des équipements de production de chaleur et d'ECS avec au moins 2 scénarios (Puissance, COP, rendement et coûts mentionnés)
 - D'une synthèse dans un tableau prédéfini
- o Rédaction d'un rapport remis au format papier au MO et stocké sur une plateforme extranet
- o Restitution de l'étude par le BET lors d'un rendez-vous physique afin de s'assurer de la compréhension du projet par le MO et de faciliter son passage de commandes auprès des professionnels
- o Analyse des devis établis par les professionnels
- D'un **accompagnement financier** pour les personnes non éligibles au programme « Habiter Mieux », lors de la mise en œuvre de la rénovation, **pour une mission d'AMO ou MOE** et la réalisation à minima d'un **test d'étanchéité à l'air à la fin de la rénovation**. Le montant de l'aide était de 50% du coût en € TTC dans la limite de 2500 €. Comme pour l'audit énergétique, les prestataires étaient issus d'un **annuaire** mis à disposition par LQE et leurs missions étaient définies dans un **cahier des charges** réalisé par la Région. Enfin, les devis de la prestation d'AMO ou de MOE devaient être communiqués à la Région pour validation.
- Enfin, sous condition de ressources et de travaux conformes aux préconisations d'un BET, la Région pouvait **financer la réalisation des travaux d'économies d'énergies**, en justifiant d'au moins 20 000 € de travaux énergétiques. Cette aide pouvait varier en fonction de la présence (4 000 € + 500 € test étanchéité) ou de l'absence (3 500 € + 500 € test étanchéité) d'une prestation d'AMO ou de MOE. En l'absence de prestation, le paiement de l'aide aux travaux était **conditionné par le résultat du test final à l'étanchéité à l'air** :
 - o 100% si $Q_4 < 0.8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$
 - o -500 € si $0.8 < Q_4 < 1,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$
 - o -1000 € si $> 1,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$
- Enfin, d'un point de vue financier, le Contrat Climat Energie définissait dans le détail la liste des dépenses éligibles pour les travaux d'isolation des parois opaques, le remplacement des baies, les tests d'étanchéité à l'air, l'installation des systèmes de ventilation, de chauffage et de production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS), et aux équipements de gestion des consommations énergétiques. Par ailleurs, les caractéristiques et les performances minimales des équipements de chauffage et d'ECS étaient spécifiées en annexe.

❖ Le dispositif Dorémi

Dispositif :



Région :

Dispositif présent à l'échelle nationale.

Dorémi est une initiative relevant de l'économie sociale et solidaire à but d'intérêt général, visant à accélérer la rénovation performante des maisons individuelles.

Présent à ce jour sur plus de 50 territoires répartis en France métropolitaine, Dorémi accompagne les collectivités partenaires, forme et accompagne les artisans, pour proposer aux propriétaires de maisons individuelle une rénovation performante en groupement d'artisans.

Définition de la rénovation performante

Le dispositif Dorémi vise une consommation moyenne de 50 kWh_{EP}/m².an de chauffage, soit un facteur 4 à l'échelle du parc. Ce niveau de consommation est obtenu en appliquant les bouquets de travaux « STR » (Solutions Techniques de Rénovation), décrits au §1.3.2, auxquels sont adjoints des systèmes de chauffage adaptés (puissance et rendements). Tous les lots sont réalisés en une même étape. La valeur ajoutée du dispositif est rattachée au travail en groupement d'artisans qui apportent une vision globale du projet et donc un bon traitement des interfaces et interactions.

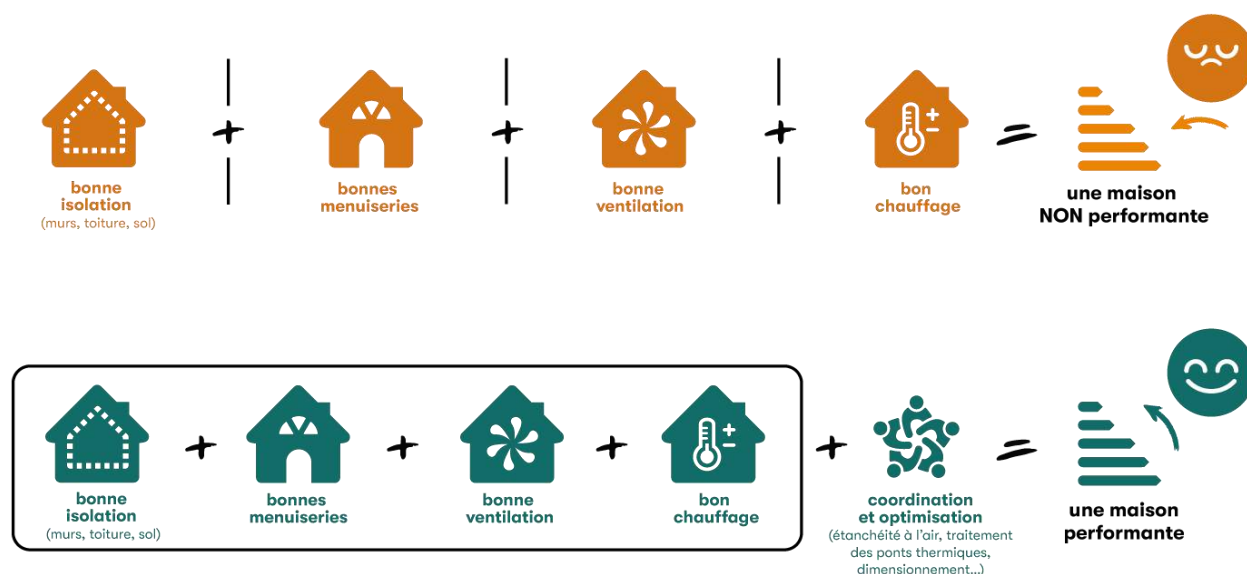


Figure 18 : Illustration de la démarche de rénovation complète et performante : parcours de rénovation par gestes et rénovation complète et performante (source : Dorémi).

Les clés du succès

Le dispositif s'appuie sur un réseau de partenaires composé d'Animateurs Territoriaux et des Formateurs-Accompagnateurs.

Les Formateurs-Accompagnateurs forment les artisans à travers un parcours de **formation-action** mêlant formation en salle (théorie) et accompagnement pédagogique sur le terrain (pratique). Ils réalisent alors leur premier chantier de rénovation performante lors de cette formation, comprenant plusieurs étapes clés : l'Etat des lieux architectural et technique (ELAT), l'élaboration des devis, la remise d'offre et le chantier. Les artisans sont structurés en groupements regroupant tous les corps d'état nécessaires à la réalisation d'une rénovation complète et performante. À la suite de cette formation, le formateur-Accompagnateur continue d'accompagner les groupements d'artisans sur tous leurs chantiers de rénovation complète et performante : en phase d'expérimentation (suivis dans Perf in Mind) en répondant à leurs questions (hotline), et depuis 2019, cet accompagnement s'est renforcé avec une présence accrue du Formateur-Accompagnateur dans toutes les étapes clés du projet décrites ci-après.

Les ménages sont informés et identifiés par les Animateurs Territoriaux, qui réalisent une **pré-visite**. Ils sont alors mis en relation avec un groupement d'artisans Dorémi.

Ce groupement réalise l'ELAT, lors duquel les artisans décident de la STR à appliquer, définissent les matériaux en prenant en compte la migration de vapeur, définissent les détails de ponts thermiques, d'étanchéité à l'air, le cheminement de la ventilation etc. Chacun réalise alors son devis, en recoupant les limites de prestation avec les autres entreprises. Un accompagnement à la construction du plan de financement est réalisé. Les devis sont remis et présentés conjointement au ménage.

Si les devis sont acceptés, le chantier se déroule, avec les conseils du Formateur-Accompagnateur (renforcé en phase de formation-action). Un test d'infiltrométrie est réalisé en cours de chantier, pour vérifier l'atteinte du niveau visé dans la STR choisie.

NB : Les projets Dorémi suivis dans Perf in Mind faisaient partie de l'expérimentation Dorémi, et reflètent donc les pratiques de cette période expérimentale. Il est important de souligner que le suivi qualité du référentiel Dorémi (décrit ci-dessus) s'est renforcé depuis, notamment dans le cadre du programme CEE Facilaréno.

Plus d'informations sur le dispositif Dorémi : <https://www.renovation-doremi.com/>

1.3.2 Conception de la rénovation

Différentes méthodes sont possibles pour concevoir une rénovation « performante », selon la définition que l'on donne à ce terme. Sur les maisons suivies dans le cadre de cette étude, 3 approches ont été utilisées : l'objectif BBC rénovation, les bouquets de travaux dits « solutions techniques de rénovation » ou STR, et l'objectif d'une rénovation à énergie positive sur le modèle EnergieSprong.

❖ L'approche BBC rénovation

Pour les logements, la définition du BBC rénovation s'appuie notamment sur un objectif de consommation maximale en énergie primaire de **80 kW.h/m²/an** sur 5 usages (chauffage, ECS, climatisation, éclairage et auxiliaires), à moduler selon la zone climatique et l'altitude. Les calculs sont faits en utilisant la méthode de calcul de la RE2005-rénovation, soit les règles Th-CE-ex. Les résultats sont exprimés en kW.h d'énergie primaire par m² de S-RT (surface de référence pour le calcul réglementaire).

Cette approche a été adoptée par **62 des maisons** suivies. Compte tenu de leur localisation géographique et de leur altitude, les projets ont visé les Cep max suivants :

Cep max	Nombre de maisons	Zone climatique
80	4	H2b
88	11	H2a
96	17	H1c
104	28	H1b
112	2	H1c et altitude >800m
Total	62	

Figure 19 : Tableau des objectifs de Cep des rénovations conçues avec un objectif BBC rénovation.

Le Cep moyen visé sur ces 62 projets est de **97,7 kW.h** d'énergie primaire / m² SRT pour les 5 usages.

Du diagnostic initial avec ses plusieurs scénarii, à la mise à jour du calcul en fin de chantier, nous avons tenté de recueillir la dernière version du calcul et de la comparer aux factures des travaux. Il n'est pas toujours évident de bien tracer l'évolution de la conception du diagnostic à la réalité mise en œuvre. La Figure 20 ci-dessous sur les 62 rénovations concernées.

Il semble au final que 4 maisons (6%) présentent un calcul RT final **non conforme** au niveau BBC, et que 6 rénovations (10%) n'ont pas respecté les préconisations du calcul, sur des postes importants laissant craindre que le niveau BBC n'est en réalité pas atteint. Sur 5 opérations (8%) nous n'avons pas pu récupérer l'étude thermique.

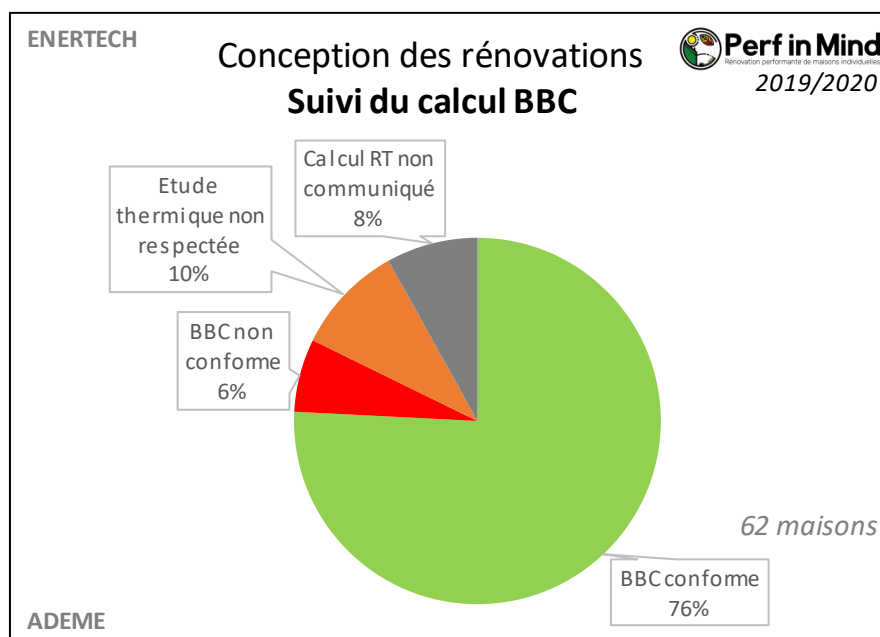


Figure 20 : Graphique du suivi des calculs BBC sur les 62 maisons concernées.

La grande majorité (au moins 76%) des maisons est bien **conforme à la définition du BBC rénovation**.

Plus d'informations : <https://www.effinergie.org/web/les-labels-effinergie/effinergie-renovation/1654>

❖ L'approche par bouquets de travaux « STR »

Cette approche vise à simplifier la conception des rénovations en évitant les calculs thermiques. En effet, l'objectif d'atteindre un parc performant à l'échelle nationale implique une performance moyenne, et non nécessairement la même consommation sur chaque maison. De plus, sachant que le coût marginal d'un isolant n'est que de quelques euros au m² de parois, il n'est pas toujours pertinent de payer un calcul pour « optimiser » quelques centimètres de plus ou de moins. L'objectif est au contraire de gagner du temps en conception pour se pencher sur les vrais sujets : étanchéité à l'air, ponts thermiques, choix des matériaux pour respecter la migration de vapeur dans le bâti ancien etc.

L'objectif recherché avec les Solutions Techniques de Rénovation est de diviser par 4 la consommation de chauffage du parc de logement, conformément aux impératifs climatiques de facteur 4. C'est ainsi une consommation de chauffage de 50 kW.h/m² en moyenne en France qui a été visée. Plusieurs milliers de simulations thermiques dynamiques réalisées par Enertech ont permis d'élaborer 10 bouquets de travaux permettant d'atteindre cette performance :

N° Solution	Isolation Int / Ext	Etanchéité air n ₅₀ (vol/h)	Résist. Additionnelles [m².K/W]			U _w [W/m².K]	Ventilation
			Murs	Plancher bas	Toiture		
1	Int	3,0	6,0	4,5	10	1,1	Double Flux
2	Int	3,0	4,5	4,5	10	0,8	Double Flux
3	Int	1,0	4,5	4,5	10	1,7	Double Flux
4	Int	1,0	4,5	3,0	7,5	1,4	Double Flux
5	Ext	3,0	4,5	4,5	7,5	1,7	Double Flux
6	Ext	3,0	4,5	3,0	7,5	1,4	Double Flux
7	Ext	3,0	6,0	4,5	10	0,8	Hygro
8	Ext	1,0	4,5	3,0	7,5	1,7	Double Flux
9	Ext	1,0	3,7	3,0	7,5	1,4	Double Flux
10	Ext	1,0	4,5	3,0	7,5	1,1	Hygro

Figure 21 : Tableau des Solutions Techniques de Rénovation (STR) pour logements dotés de systèmes de chauffage par combustible ou par PAC (COE>3) – Version compatible avec les exigences des organismes financeurs

Une variante est prévue lorsqu'il n'est pas possible d'isoler le plancher bas : on réalise alors une isolation périphérique, et on augmente la résistance thermique des murs de 1 m².K/W, sauf quand on vise déjà un R=6. On parle alors de STR « bis ».

D'autres bouquets sont prévus dans le cas d'un chauffage par radiateurs électriques conservé.

Cette approche a été adoptée par **32 maisons**. Les STR utilisées sont les suivantes :

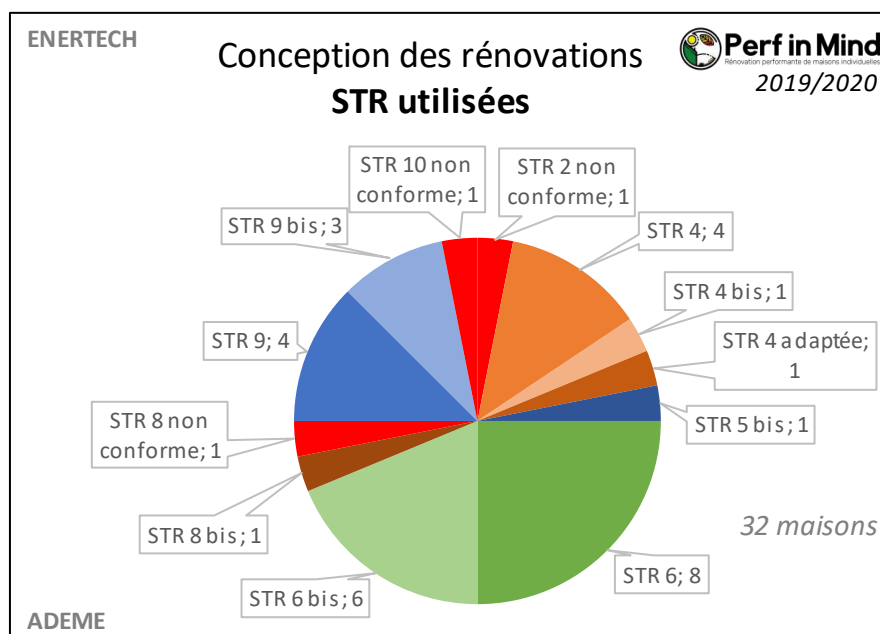


Figure 22 : Graphique des STR utilisées sur les 32 maisons concernées.

Les STR les plus utilisées sont celles en ITE, et notamment la **STR 6** et 6 bis, utilisée dans 44% des cas, suivie de la **STR 9** et 9 bis utilisée dans 22% des cas. En ITI, c'est la **STR 4** et 4 bis qui est la plus utilisée (16% des cas).

A noter que pour 3 maisons (9% des cas), les **STR n'ont pas été respectées** dans les devis finaux. Pour une autre maison la STR a été adaptée, sans qu'a priori la performance en soit dégradée.

La grande majorité des rénovations (91%) sont **conformes aux préconisations** de la STR choisie.

Plus d'informations sur les STR : <https://www.enertech.fr/rubrique/rubrique-44-2/>

❖ La rénovation à énergie positive sur le modèle EnergieSprong

Nous avons pu suivre dans le cadre de cette étude une opération de 12 maisons en bande ayant bénéficié d'une rénovation à énergie positive avec préfabrication des façades à ossature bois, basée sur la démarche EnergieSprong.



L'objectif énergétique est que ces maisons soient à énergie positive, c'est-à-dire que les panneaux photovoltaïques dont elles sont équipées produisent autant ou plus que leur consommation tous usages confondus, c'est-à-dire non seulement les 5 usages réglementaires mais aussi toute l'électricité spécifique (électroménager etc.) et la cuisson.

La conception de la performance a été réalisée par un bureau d'étude (POUGET consultants). Les préconisations formulées ont permis de répondre au cahier des charges et à la définition de la performance Energie positive définie par EnergieSprong.

Cette opération faisant l'objet d'une garantie de performance énergétique, une instrumentation a été mise en place par l'équipe du projet, qui a bien voulu nous en communiquer les données utiles à notre suivi (au niveau « base »).

Plus d'informations sur la démarche EnergieSprong : <http://www.energiesprong.fr/>

1.3.3 Suivi du chantier

Une des étapes-clé de la réussite du projet de rénovation est la réalisation du chantier. Nous avons posé la question de l'accompagnement spécifique dont se souviennent avoir bénéficié les ménages dans le questionnaire qui leur a été soumis.

La représentation graphique ci-dessous présente les réponses reçues (90 réponses sur les 106 participants). Celles-ci sont souvent multiples : les particuliers ont pu bénéficier de plusieurs acteurs pour l'accompagnement en phase chantier. Sur la figure ci-dessous, chaque colonne est associée à un projet et les cases colorées identifient la ou les structures citées par les ménages. En fin de ligne on indique le nombre fois où l'acteur est cité pour avoir participé au suivi de chantier.

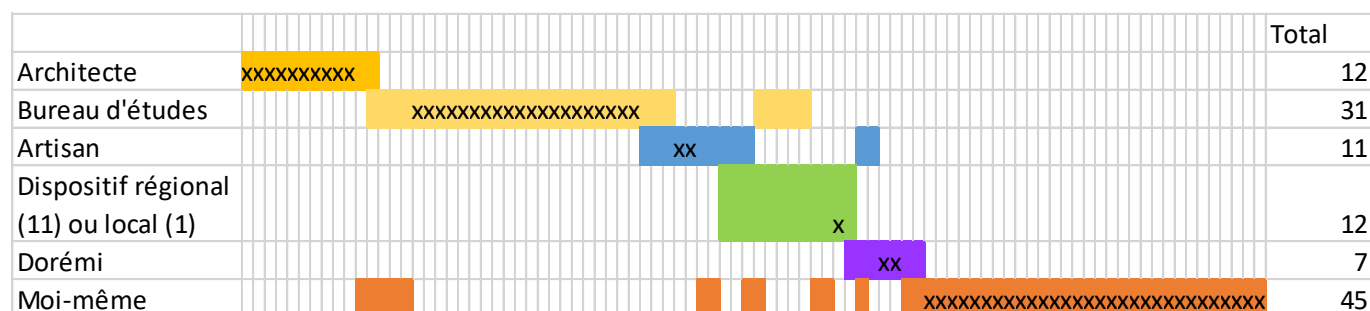


Figure 23 : Représentation graphique des réponses à la question « Qui a assuré le suivi de chantier de rénovation ».

NB : les données présentées ici sont les réponses des participants, et peuvent avoir un caractère subjectif. Nous ne connaissons pas en détail la réalité de l'accompagnement dont les ménages ont bénéficié en phase chantier, mais il se peut qu'il y ait des écarts avec leur ressenti présenté ici.

Les croix « x » identifient les réponses ne citant qu'un acteur unique pour la phase chantier : on compte ainsi 10 architectes et 20 BE qui ont suivi seuls le chantier, 2 artisans qui ont piloté seuls le chantier selon le ménage, 1 cas où le dispositif régional est le seul acteur cité par le ménage et 2 cas où Dorémi est seul cité. Enfin et surtout, pour 30 rénovations, le ménage répond qu'il a été le seul acteur à suivre le chantier.

Ainsi, malgré le fait que chaque ménage a bénéficié d'un dispositif d'accompagnement à la rénovation, **un tiers d'entre eux (30 sur 90) ont eu le sentiment d'avoir eu à gérer seul le chantier** (réponse « moi-même » sans citer un autre acteur). 2 ménages en plus de ces 30 se déclarent « sachant » (l'un Architecte et l'autre Bureau d'études), et 1 ménage déclare avoir fait appel à un membre de sa famille, dont on peut supposer qu'il est du métier également.

12 ménages supplémentaires ont ressenti le besoin de mentionner la réponse « moi-même » en plus d'un ou plusieurs autres acteurs. On peut supposer qu'ils souhaitaient signifier ainsi qu'ils ont dû s'occuper eux-mêmes d'une partie de la gestion du chantier.

31 chantiers ont été suivis par un **Bureau d'études** (28) ou un « maître d'œuvre » (3), 12 ont été suivis par un **Architecte**. Un chantier a bénéficié du suivi conjoint d'un Bureau d'étude et d'un Architecte. A noter que les 12 maisons rénovées à énergie positive n'ont pas fait l'objet de ce questionnaire, et s'ajoutent donc à ces chiffres puisqu'elles ont fait l'objet d'un suivi de chantier par la maîtrise d'œuvre.

11 ménages mentionnent **les Artisans** comme ayant assuré le suivi de leur chantier. Les réponses précisent généralement une qualification par un tiers (« Artisan qualifié par la Région », « Artisan pilote Dorémi », « Artisan RGE ») ou une « Entreprise de rénovation globale BBC » (sans préciser la nature de cette qualification). La notion de « Groupement d'artisan » est également citée.

Les **dispositifs régionaux ou locaux** sont cités dans 12 réponses.

Le dispositif **Dorémi** est cité dans 9 réponses. A noter que Dorémi n'a pas pour mission d'intervenir auprès des ménages en phase chantier mais d'accompagner les artisans au respect d'un référentiel de qualité. Il est intéressant que les ménages aient tout de même mentionné la présence de cet accompagnement. On souligne également que ce référentiel qualité a beaucoup évolué depuis les opérations suivies ici, et l'accompagnement des artisans en phase chantier a été renforcé.

1.3.4 Date des travaux de rénovation

Pour la plupart des maisons, les travaux de rénovation ont démarré entre les années 2015 et 2018. Pour certaines d'entre elles les travaux remontent jusqu'à 2008.

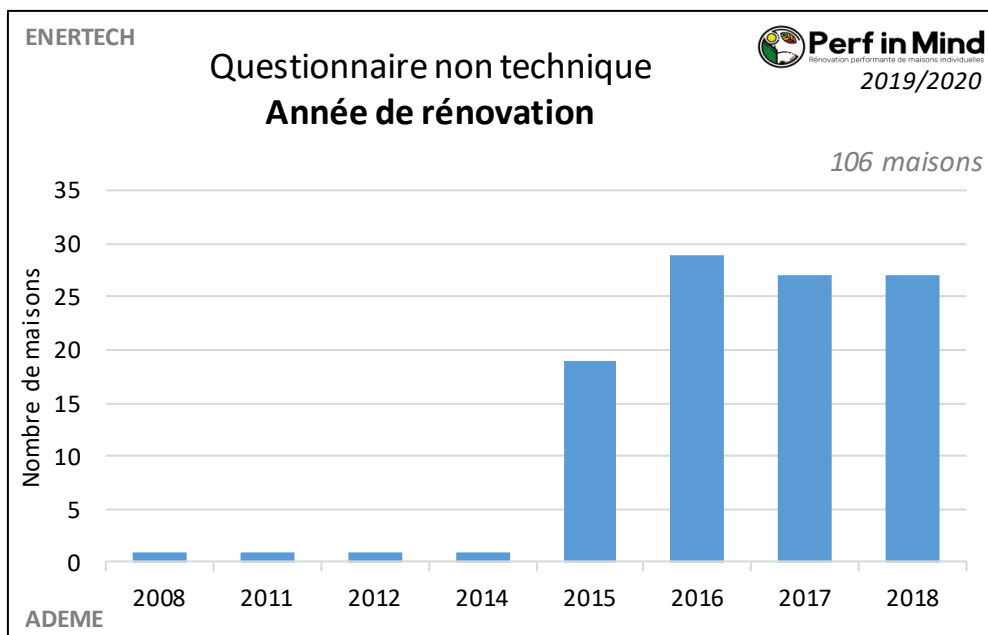


Figure 24 : Graphique du nombre de maisons par année de début de la rénovation.

La durée des travaux n'est pas connue avec précision, car le questionnaire et les données récupérées ne comportaient que l'année civile de début et de fin. On peut tout de même se faire une idée avec le graphique suivant, qui indique sur combien d'années civiles les travaux se sont déroulés :

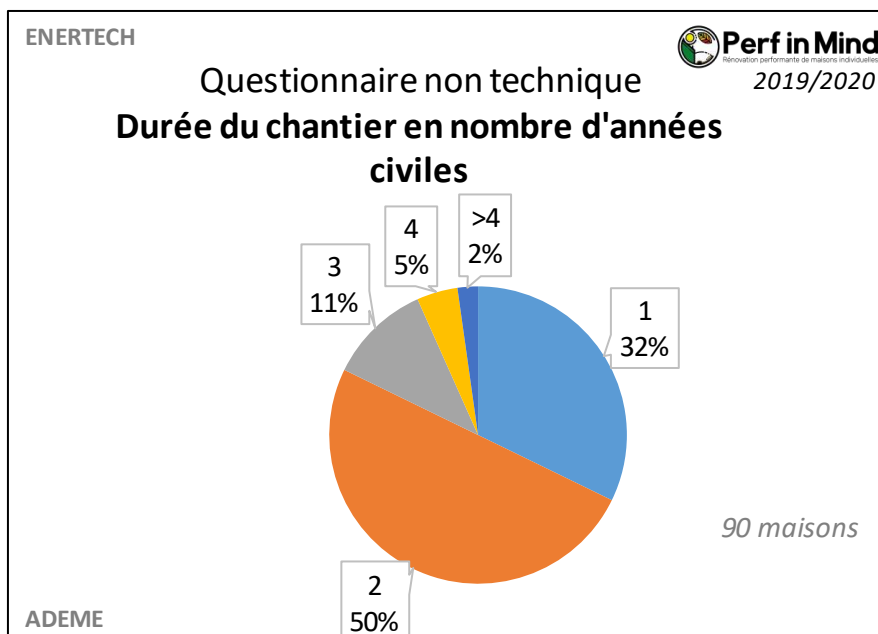


Figure 25 : Graphique de répartition des maisons par nombre d'années civiles sur lesquelles le chantier s'est déroulé.

On note qu'un tiers environ des chantiers se sont déroulés sur une seule année civile, donc ils ont duré entre quelques mois et un an. La moitié de chantiers ont eu lieu sur deux années civiles, donc ont duré entre quelques mois et 2 ans. Moins d'un chantier sur 5 s'est déroulé sur plus de 2 années civiles.

1.4 Maintenance des installations

1.4.1 Qui assure la maintenance des installations de chauffage/ECS ?

Dans les deux-tiers des cas les installations de chauffage sont maintenues par un chauffagiste et dans 19% par une société de maintenance spécialisée. Seuls 6% se chargent eux-mêmes de l'entretien et pour 4% des maisons aucune maintenance n'est réalisée.

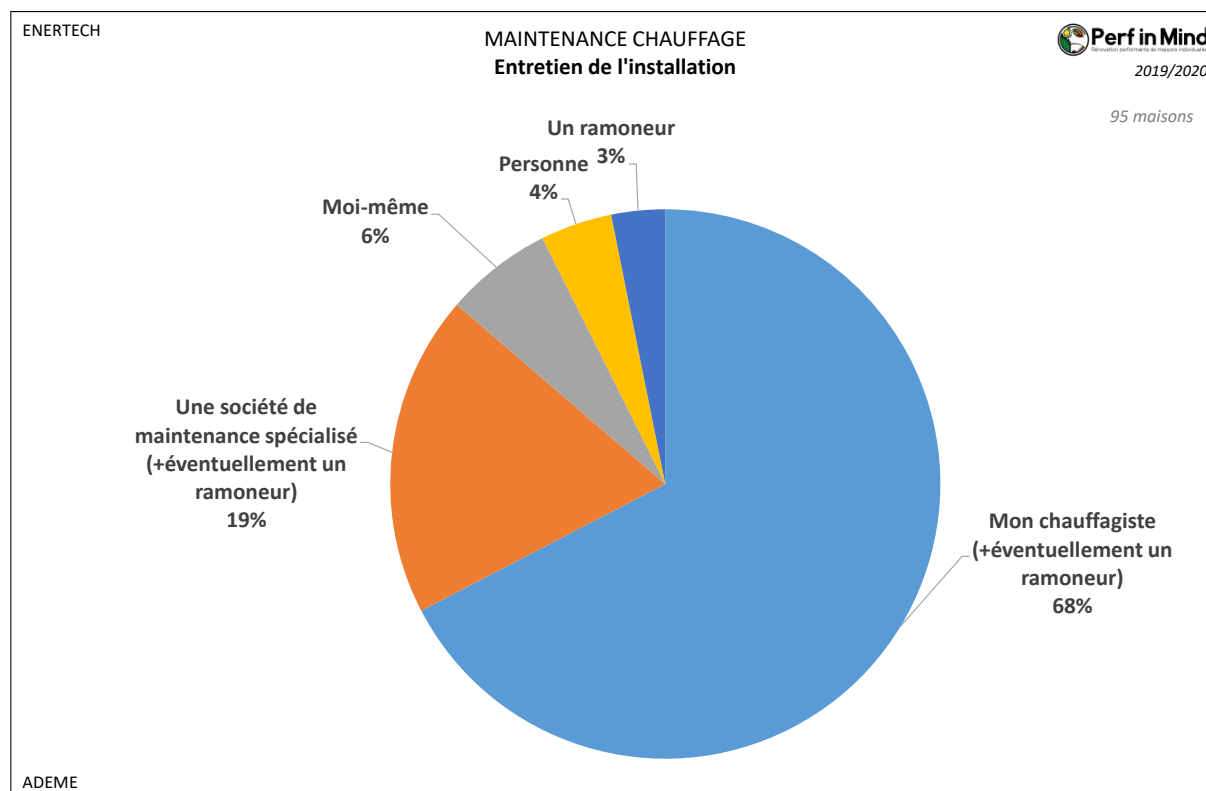


Figure 26 : Graphique des acteurs qui réalisent la maintenance de l'installation de chauffage et ECS.

1.4.2 Maintenance des installations de ventilation

Cette question n'a été posée qu'aux propriétaires de maisons équipées d'une ventilation double flux. En effet, bien qu'une maintenance soit également nécessaire pour les ventilations simple-flux, la présence de filtres en double-flux nécessite des interventions plus fréquentes.

A l'inverse des installations de chauffage, la maintenance des systèmes de ventilation est effectuée principalement par les propriétaires eux-mêmes. Dans moins de 10% des cas ils font appels à un prestataire (société de maintenance ou électricien). A noter que 4% des répondants déclarent ne pas entretenir le système... ce qui peut expliquer certains dysfonctionnements observés (voir la suite de ce chapitre sur l'encrassement des filtres, ainsi que les conséquences sur les débits au [§3.1.3](#) et sur les puissances électriques au [6.1.1](#)).

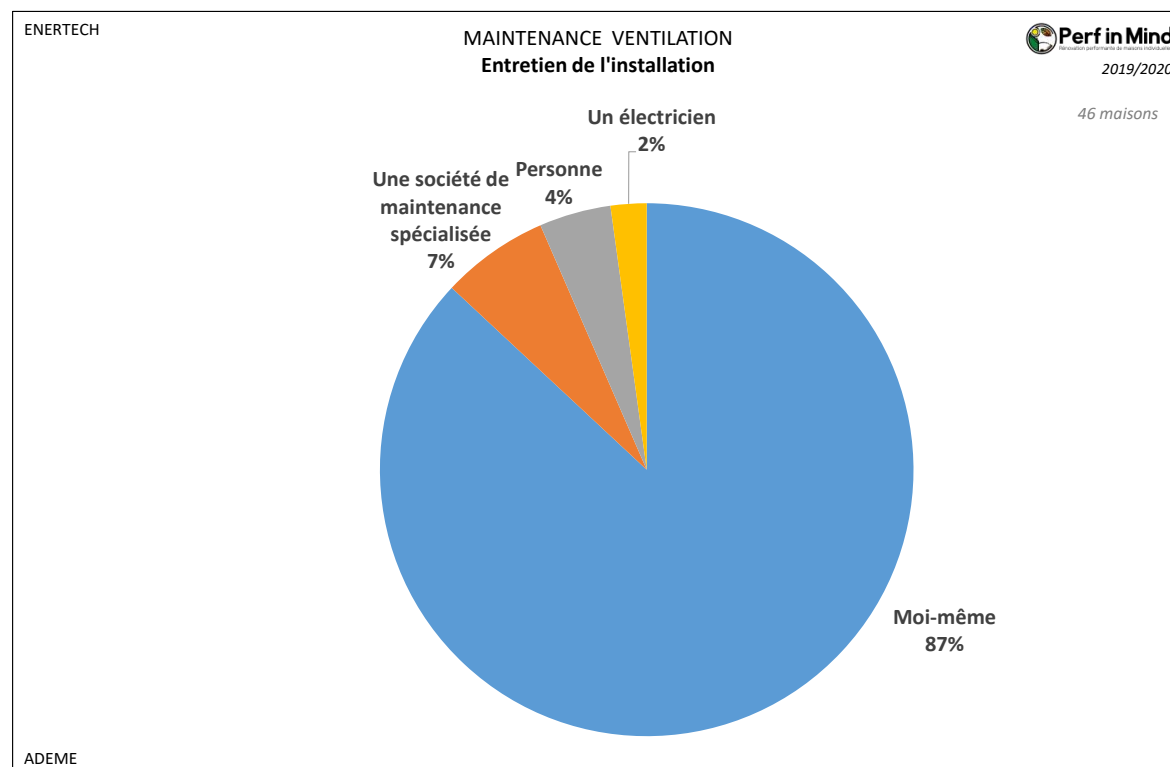


Figure 27 : Graphique des acteurs qui réalisent la maintenance des installations de VMC double flux.

Les réponses concernant la fréquence de changement des filtres sont variables d'un logement à l'autre :

- Majoritairement **une** (41%) ou **deux** (35%) **fois par an**,
- Minoritairement trois fois par an (13%) ou une fois tous les deux ans (9%).

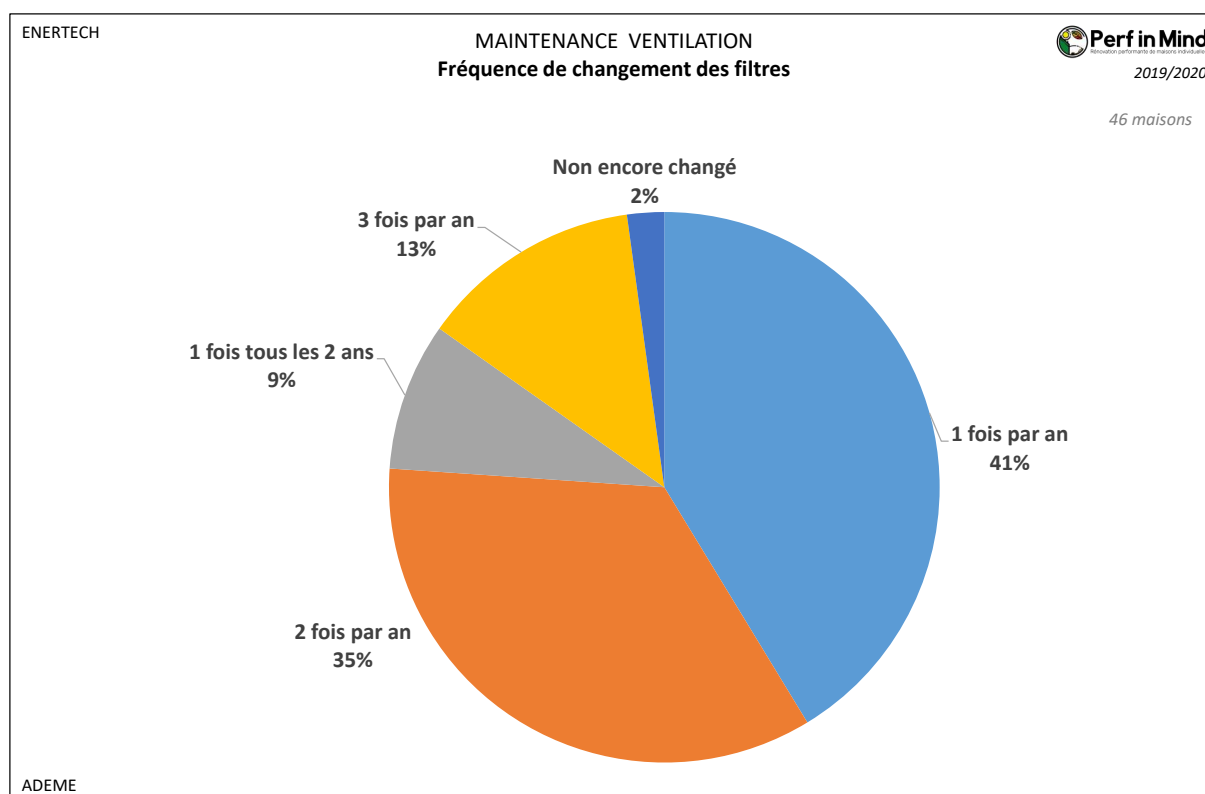


Figure 28 : Graphique de la fréquence de remplacement des filtres des VMC double flux.

Au cours de l'instrumentation des logements avancés, nous avons systématiquement évalué l'état des filtres des ventilations double-flux. Le niveau d'encrassement est acceptable dans plus de deux tiers (10 sur 14) des logements pour l'air neuf (le plus important pour les aspects sanitaires) et seulement 57% des cas (8 sur 14) pour l'air extrait.

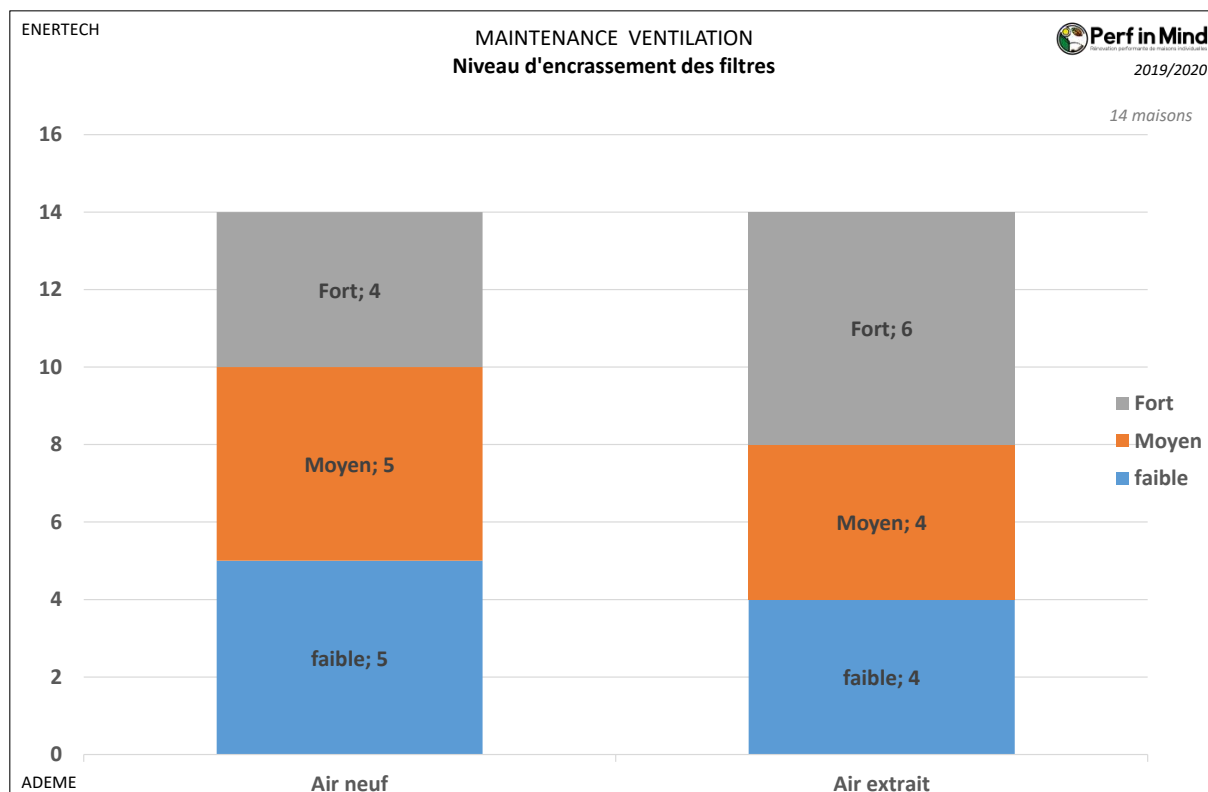


Figure 29 : Graphique du niveau d'encrassement des filtres des VMC double flux lors de l'instrumentation les maisons en suivi « avancé ».

Comme l'illustre la photographie de la Figure 30 ci-dessous, l'état des filtres est très différent d'un logement à l'autre.



Figure 30 : Photo de filtres VMC double flux, propres (à gauche) et encrassés (à droite).

Pour illustrer l'étendue du niveau d'appropriation par les différents ménages, l'un des occupants nous a signalé non seulement remplacer ses filtres lui-même, mais au lieu de racheter des filtres neufs il remplace uniquement le médium filtrant, acheté en rouleau.

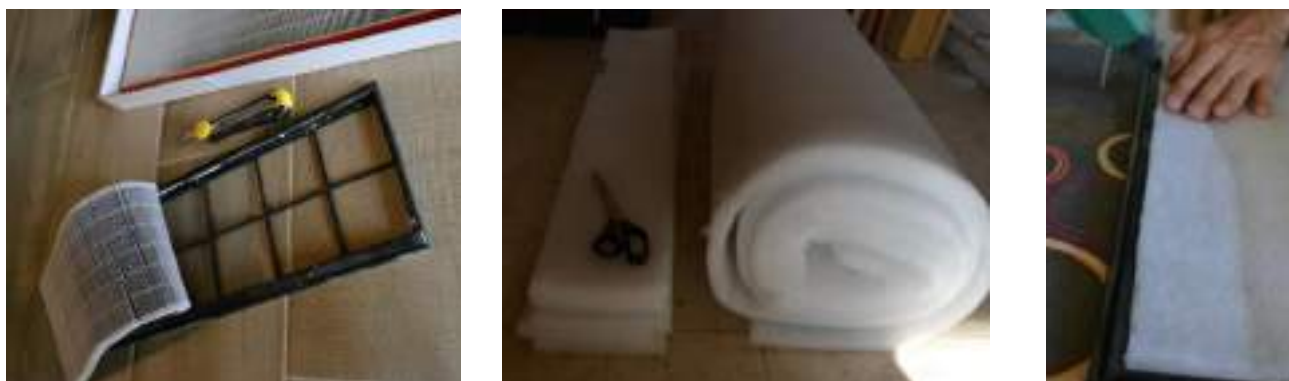


Figure 31 : Photos de la réalisation de filtres « maison » à partir d'un rouleau de médium filtrant (de type G4) : dépose du médium encrassé pour récupérer le cadre du filtre, découpe du médium filtrant neuf.

Les filtres ainsi réalisés lui coûtent moins de 1€ la paire (contre 40€ la paire pour cette même installation). La perte de charge des filtres « maison » étant inférieure à celle des filtres neufs d'origine, un nouveau réglage de la consigne de la centrale double flux a été réalisé.

L'impact des filtres encrassés sera abordé au [§3.1.3](#) pour l'impact sur les débits mesurés, et au [§6.1](#) pour l'impact sur la consommation électrique.

1.5 Usage et satisfaction

1.5.1 Synthèse des entretiens qualitatifs

Contexte

Une enquête qualitative a été menée auprès de dix ménages issus du panel des 40 foyers instrumentés à un niveau « avancé ». Ces 10 ménages sont répartis sur cinq régions, et ont été rencontrés en entretien pour rendre compte de leur expérience d'occupant à la suite d'une rénovation thermique performante, en termes de satisfaction, d'acceptabilité et d'appropriation de ce logement rénové. En effet, la performance effective d'un bâtiment rénové tient pour partie au bâti, mais n'existe qu'à travers la participation de l'occupant à cette performance. Cette enquête vise donc à caractériser la contribution de l'occupant à cette performance, et à partir de ces témoignages, identifier les points de vigilance et éventuelles pistes pour améliorer l'accompagnement à la rénovation performante.

État de l'art

Une première étape a été de constituer un état de l'art ciblé sur cette thématique particulière, pour préciser le questionnement de cette recherche (*Livrable D 3.5 – État de l'art préalable à l'enquête sociologique* disponible sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>). Les principaux éléments sont résumés ci-dessous.

Plusieurs études montrent que la norme sociale du confort est manifestement supérieure aux 19°C prescrits par le code de la Construction, plutôt de l'ordre de 20 voire 21°C, y compris pour des maisons BBC ou passives⁷. La logique majoritaire qui commande les pratiques domestiques tient à la recherche du confort, devant le souci de modération budgétaire ou énergétique, même si ces préoccupations restent importantes. La signification d'un « rebond » des consommations après travaux doit être analysée avec précaution : elle peut tout autant indiquer des restrictions et une situation d'inconfort avant les travaux, qu'une consommation excessive liée à un bâtiment supposé économe.

D'autres travaux relèvent que les bâtiments performants requièrent une attention particulière et nouvelle par rapport aux modes d'habiter antérieurs (gestion ouvertures et occultations, réglage et entretien des appareils, préservation étanchéité à l'air...). Cela incite à être vigilant sur la convivialité des équipements et l'acceptabilité des stratégies et comportement prescrits pour que les pratiques attendues soient réellement effectives. Enfin, la technicité accrue des équipements induit un temps d'appropriation et d'ajustements après travaux (sur la première année d'occupation). Cette période pourrait nécessiter un accompagnement.

⁷ CGDD, La rénovation thermique des logements : quels enjeux, quelles solutions ? [\[en ligne\]](#), la revue du CGDD, janvier 2015. Cette étude montre que la température la plus souvent enregistrée dans les séjours se situe à 21°C, mais plutôt moins pour les autres pièces donc une moyenne pour le logement sans doute entre 20 et 21°C ;

Place A., Retour d'expérience concours Ma Maison Eco, Région centre Val de Loire, service transition énergétique (document interne), juin 2017. Cette étude porte spécifiquement sur des maisons BBC et passives, pour qui la température de consigne moyenne se situerait autour de 20°C ;

Brisepierre G., Analyse sociologique de la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. Bilan et perspectives [\[en ligne\]](#), ADEME, 2013. Cette étude indique que "la température idéale la plus souvent déclarée est de 20 °C" mais annonce plus loin que "la température moyenne des logements serait passée de 19°C à 21°C entre 1986 et 2003", sans toutefois renvoyer à une enquête.

Pour les références bibliographiques complètes voir le livrable « Etat de l'art préalable à l'enquête sociologique » cité précédemment.

Résultats

Les résultats de l'enquête qualitative se présentent sous la forme d'un rapport complet (*Livrable D 3.5 – Étude sciences sociales de l'expérience d'« usager-occupant »*. *Analyse des entretiens et observations sur 10 maisons/usagers* disponible sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>) et d'un rapport de synthèse (*Livrable D 3.5 – Étude sciences sociales de l'expérience d'« usager-occupant »*. *Rapport de synthèse avec recommandations* disponible sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>). Les principaux résultats sont résumés ci-dessous.

Il s'agissait à travers cette enquête qualitative d'évaluer la satisfaction des habitants, l'appropriation des systèmes et des pratiques préconisées, et finalement l'acceptabilité de la rénovation performante de l'habitat individuel. **Sur la base de ces 10 entretiens, cette acceptabilité ne fait pas de doute.** Les ménages se sentent bien chez eux, trouvent leur maison confortable en hiver, et sont satisfaits du montant de leurs factures énergétiques. La part de ménages modestes et très modestes dans cet échantillon restreint confirme que la rénovation performante leur est accessible, et qu'elle leur permet de s'extraire de situations de restriction lorsqu'ils y ont été confrontés.

Au-delà de ces éléments très positifs, on a pu identifier **quelques bémols** qui montrent autant de pistes d'amélioration. Certains sont d'ordre technique (confort d'été ou acoustique, perte d'espace habitable en ITI), et semblent demander une vigilance accrue à la conception et à la mise en œuvre, de la part des artisans et des dispositifs accompagnateurs. D'autres sont d'ordre organisationnel. Il ressort en effet de cette enquête que l'appropriation du logement rénové pourrait nécessiter un accompagnement : pour la compréhension et la maîtrise de la ventilation ; pour les pratiques permettant de limiter les surchauffes estivales ; pour le réglage, la programmation et l'entretien des appareils de chauffage et de ventilation.

Trois périodes semblent **requérir un accompagnement** : la conception, pour faire des choix compatibles avec la façon de vivre du ménage, la mise en service pour la prise en main des systèmes de chauffage et ventilation, et une troisième période après un temps d'occupation pour ajuster les premiers réglages. Au vu du retour des ménages sur la réalisation des travaux, on s'interroge également sur la nécessité d'un meilleur accompagnement du chantier, par exemple sous la forme d'une AMO ou d'une MOE.

Pour les 10 ménages rencontrés, les températures des logements sont supérieures au 19°C du code de la Construction. Cependant si la fourchette des températures déclarées varie entre 18,5°C et 21,5°C, la moyenne se situe à 20,2°C, ce qui ne laisse pas présupposer d'un « effet rebond » important sur les consommations de chauffage. Cette valeur moyenne est très proche de celle observée par la mesure qui est de 20°C (voir §8.1). Globalement, les ménages rencontrés semblent plutôt vigilants à maîtriser leurs consommations.

Cette enquête nous a conduits à **formuler quelques propositions**, qui nous semblent pouvoir améliorer la qualité de l'accompagnement à la rénovation performante, la satisfaction des occupants et donc la performance réelle des logements. Elles peuvent être consultées dans le **rapport de synthèse** (Livrable D 3.5 – cité plus haut).

1.5.2 Résultats quantitatifs

L'enquête par questionnaire a permis de fournir des éléments quantitatifs à partir de données obtenues sur un échantillon plus large (questionnaire envoyé aux 106 ménages suivis).

Satisfaction globale

Parmi les 95 ménages enquêtés, 96 % des répondants (87/91) se déclarent plutôt ou entièrement satisfaits et aucun ne s'est déclaré insatisfait de la rénovation performante de leur logement. C'est donc un retour **globalement très positif sur la rénovation performante et les dispositifs d'accompagnement** déployés sur les territoires (voir figure ci-dessous). Le reste du questionnaire et l'enquête qualitative auprès de 10 ménages permettent d'éclairer les éléments pouvant être améliorés dans les stratégies de travaux et les dispositifs d'accompagnement.

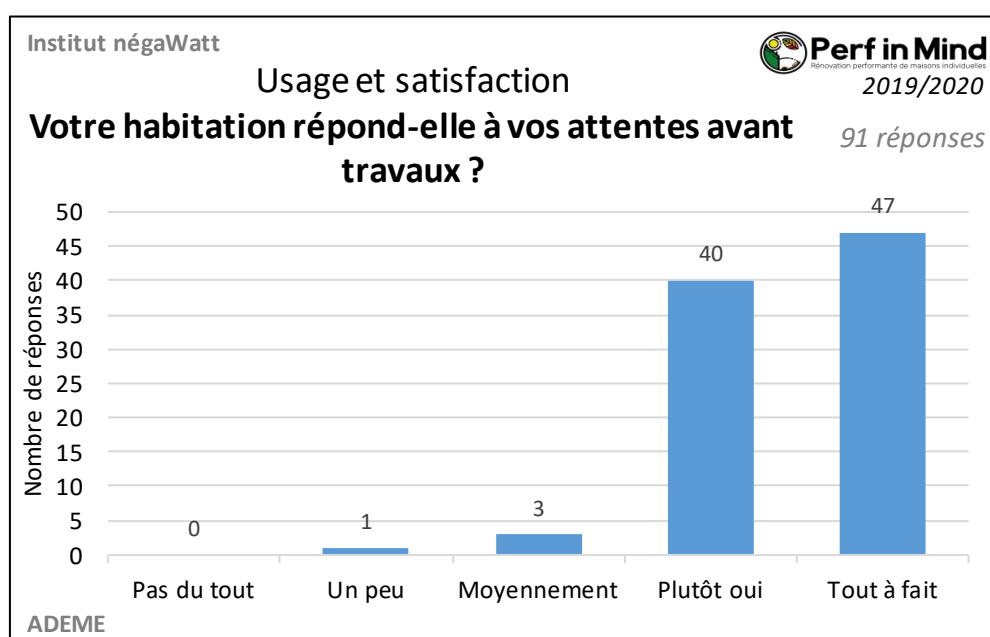


Figure 32 : Satisfaction globale (« Votre habitation répond-elle à vos attentes avant travaux ? »)

Confort thermique en été et en hiver

Sur le plan du confort thermique en particulier, les ménages enquêtés sont très satisfaits d'avoir entrepris ces travaux (voir figure ci-dessous). Alors qu'ils étaient 95 % à être insatisfaits ou moyennement satisfaits du **confort thermique en hiver** avant travaux, ils sont 99 % à être satisfaits ou très satisfaits après travaux (1 seul répondant se déclare moyennement satisfait).

En revanche la même question sur le **confort d'été** montre que cet aspect de la rénovation thermique pourrait être mieux pris en compte dans les stratégies de rénovation et l'accompagnement des ménages. 18 % des répondants sont insatisfaits ou moyennement satisfaits du confort estival après travaux. Seuls 30 % des répondants se déclarent très satisfaits contre 69 % pour le confort thermique en hiver. Ce point avait été identifié et est détaillé dans l'enquête qualitative et fait l'objet de préconisations détaillées. Ce résultat semble cependant tout à fait acceptable.

On notera que **le confort d'été demande une plus grande implication de l'utilisateur** que le confort d'hiver (gestion des occultations, surventilation nocturne ou matinale, ...), y compris lorsque la stratégie de rénovation a mis en œuvre des solutions passives (inertie importante, protections extérieures du rayonnement solaire, etc.). Au-delà des stratégies de rénovation, c'est donc aussi la question de l'accompagnement à la maîtrise d'usage qui se pose. Ces résultats, en termes de satisfaction et de points de vigilance, rejoignent ceux de l'enquête MEASURE conduite en 2018 sur des logements neufs (voir état de l'art).

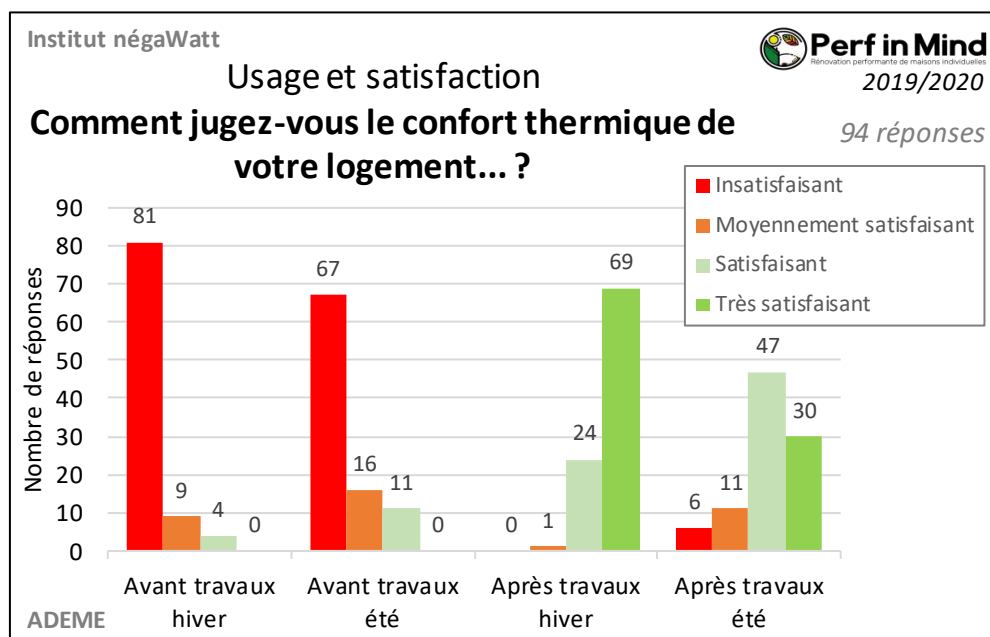


Figure 33 : Confort thermique d'hiver et d'été : "Comment jugez-vous le confort thermique de votre logement... ?"

La température de confort intérieure est évaluée par les ménages autour de 20°C plus volontiers que les 19°C pris en compte dans les calculs thermiques, ce qui rejoint d'autres études évoquées dans l'état de l'art préalable à cette enquête (CGDD, 2015). Ces résultats déclaratifs pourront être comparés à ceux issus de la campagne de mesure : la température moyenne mesurée est également de 20°C (voir §8.1.1), ce qui montre la cohérence entre température souhaitée et température obtenue. De plus, cette observation indique l'absence de dérive à la hausse de la température de consigne (pas d'effet rebond direct). Seuls 10 % des ménages déclarent apprécier une température supérieure à 21°C (voir figure ci-dessous).

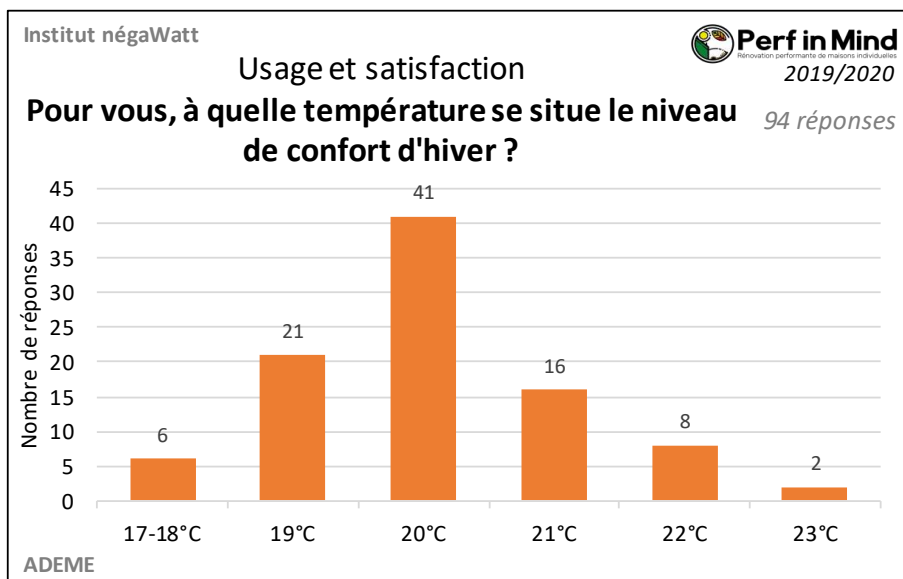


Figure 34 : "Pour vous, à quelle température se situe le niveau de confort d'hiver (en °C) ?"

Satisfaction vis à vis des dépenses énergétiques

Sur le plan économique, les ménages enquêtés sont un peu moins unanimes que sur le plan du confort. Ils sont cependant près de 80 % à se déclarer très satisfaits ou plutôt satisfaits du **montant de leur facture énergétique** (voir ci-dessous). Aucun ne se déclare insatisfait. Cette réduction de leurs dépenses semble avoir été correctement estimée avant de réaliser les travaux, **puisque les prévisions de dépenses énergétiques** ont semblé satisfaisantes ou très satisfaisantes à 72 % des ménages qui ont bénéficié de ces calculs. Un seul ménage s'en déclare insatisfait. En revanche les **coûts de maintenance** semblent avoir été moins bien anticipés et les ménages les ont parfois découverts à l'usage. 59 % des ménages sont très satisfaits ou plutôt satisfaits de ces coûts d'usage, mais 41 % sont moyennement satisfaits ou insatisfaits de ce poste de dépenses. Le coût des filtres de VMC double-flux a en particulier été mentionné dans les questions ouvertes de ce questionnaire et dans les entretiens qualitatifs.

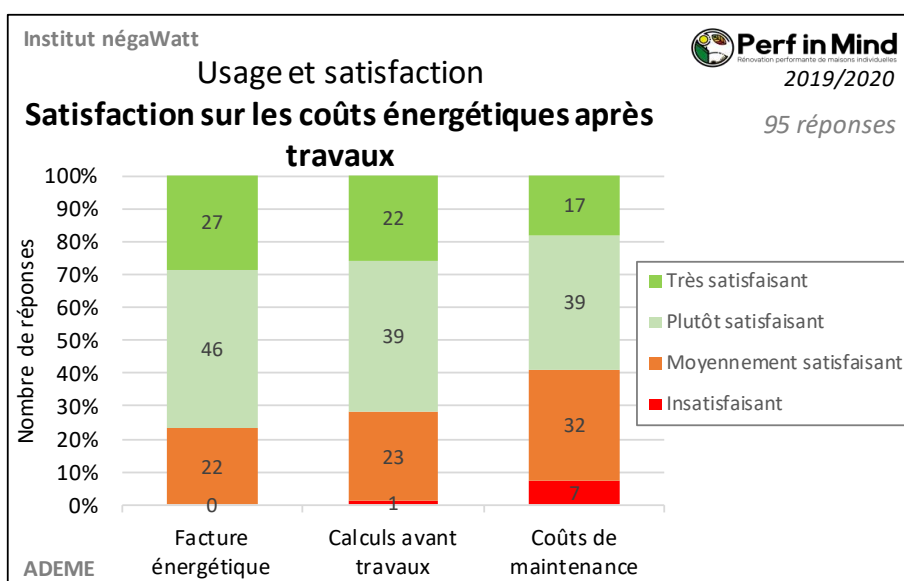


Figure 35 : Satisfaction des 95 ménages enquêtés sur les coûts énergétiques après travaux

Ces coûts pourraient sans doute être mieux pris en compte dans les calculs présentés avant travaux aux maîtres d'ouvrage. D'autre part l'accompagnement des ménages dans la prise en main de leur logement après rénovation permettrait une meilleure acceptation de ces coûts, qui seraient mieux anticipés et peut-être aussi mieux maîtrisés (filtres VMC de marque générique ?).

Confort acoustique

Le **bruit lié aux systèmes de ventilation** constitue un point de vigilance en conception et en phase chantier (voir figure ci-dessous). Un tiers des ménages enquêtés ressent une gêne acoustique liée à l'installation de VMC. L'enquête qualitative avait montré que lorsque l'aspect acoustique est négligé, les ménages s'approprient difficilement les installations de VMC, dont ils maîtrisent mal par ailleurs le fonctionnement et ne comprennent pas toujours bien l'utilité (voir enquête qualitative). Le questionnaire confirme que ce point doit faire l'objet d'une attention particulière dans les stratégies de rénovation et leur accompagnement. Cette problématique concerne les installations double-flux et simple-flux. Cependant les risques de gêne sont plus élevés en double-flux (présences de bouches dans les toutes les pièces, dont les chambres). Par ailleurs la nouveauté et la technicité de ces installations chez les particuliers incite à être particulièrement vigilants sur leur mise en œuvre et l'accompagnement à la maîtrise d'usage.

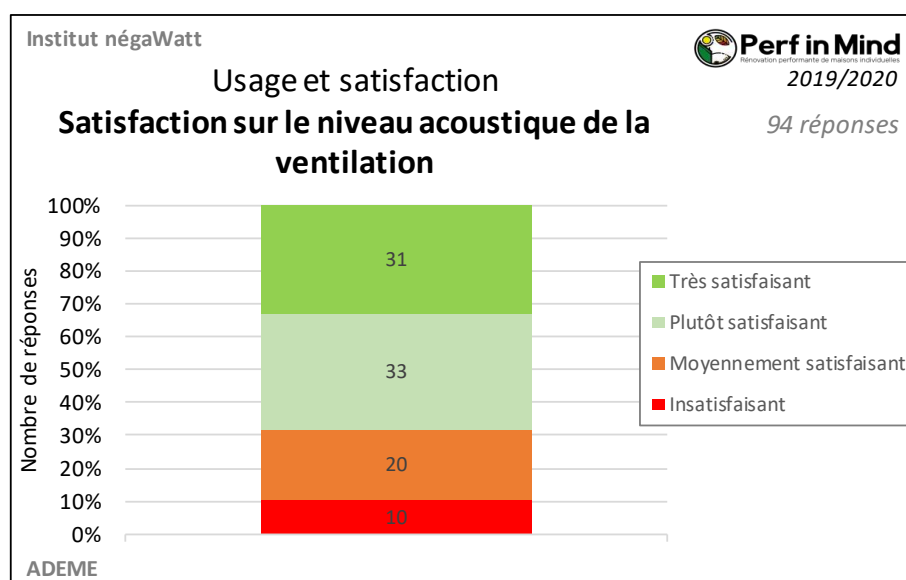


Figure 36 : "Êtes-vous satisfait du niveau acoustique de votre installation de ventilation ?"

A noter qu'à la différence du confort thermique, on ne peut pas comparer le ressenti exprimé ici à une mesure objective. Sans minimiser l'importance de l'acoustique, on souligne que le ressenti est très personnel. Les causes du bruit peuvent également être diverses : ventilateur bruyant, posé en contact avec la charpente ou sur une cloison trop légère, absence de piège à son, réseau peu qualitatif ou mal mis en œuvre, sur-débit etc. Le croisement du questionnaire avec la mesure des débits montre que pour les 3 maisons présentant les sur-débits les plus importants, 2 d'entre elles font l'objet d'un confort acoustique jugé Insatisfaisant (voir [§3.1.3](#)).

Qualité de l'air

La qualité de l'air intérieur est satisfaisante pour les 3/4 des ménages enquêtés (voir figure ci-dessous). Cependant on notera que la moitié des ménages (45/94) pratiquent une aération manuelle en

complément de la VMC sur la période de chauffage (voir aussi enquête qualitative). Ces données seront à croiser avec les données de la campagne de mesure sur la qualité de l'air (voir [partie 9](#)).

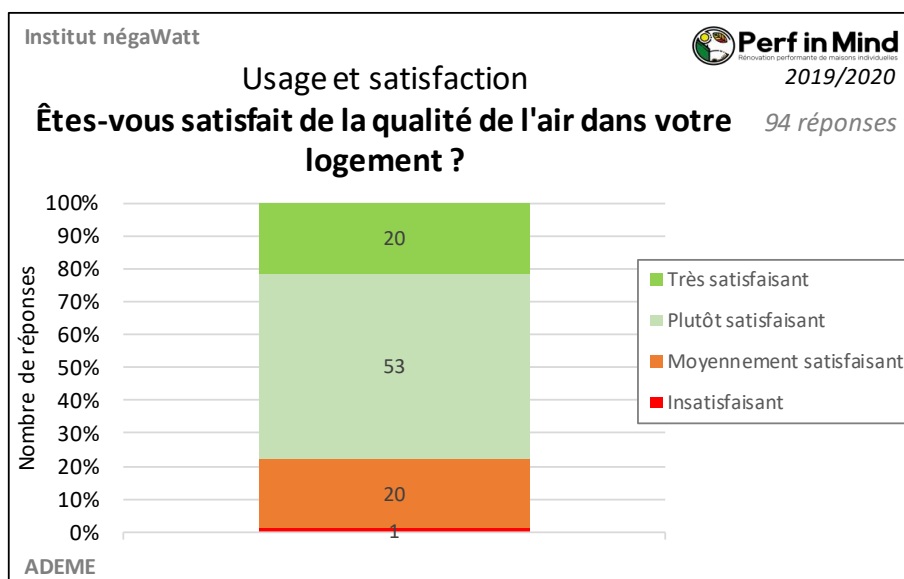


Figure 37 : "Êtes-vous satisfait de la qualité de l'air dans votre logement ?"

Satisfaction en phase chantier et appropriation

Concernant le **déroulement des chantiers**, la satisfaction est globalement bonne, mais plus contrastée (voir figure ci-dessous). La qualité des travaux ressort comme un élément particulièrement positif : seuls 7 % des répondants déclarent ne pas en être satisfaits. L'étude des commentaires à ce sondage montre que certains chantiers ont subi des malfaçons ou des difficultés avec des entreprises. Les délais annoncés semblent globalement bien tenus, avec cependant des dérapages pour 17 % des ménages enquêtés.

Les **dispositifs d'accompagnement** sont appréciés sans réserve par 67 % des répondants. En revanche 17 % n'en ont pas été satisfaits. Les dispositifs régionaux sont différents entre eux, mais les entretiens menés auprès de 10 ménages et d'autres questions de ce questionnaire permettent d'éclairer cette appréciation. Sont notamment évoqués par les ménages l'impossibilité de choisir ou exclure une entreprise dans le cas de fonctionnement en groupement, et l'absence de maître d'œuvre ayant autorité sur les autres artisans (bien que les ménages n'auraient pas toujours été disposés à solliciter une prestation facturée de maîtrise d'œuvre).

À la question « **Si c'était à refaire ?** », 10 ménages sur les 54 qui n'ont pas eu de maître d'œuvre sur leur chantier déclarent qu'ils feraient appel à un maître d'œuvre pour coordonner le chantier. Ce point est également ressorti de l'enquête qualitative. Par ailleurs il faut relativiser ces retours du fait que certains ménages ont « essuyés les plâtres » d'un dispositif d'accompagnement en phase de rodage (situation rencontrée à plusieurs reprises dans le cadre de l'enquête auprès des ménages).

La **maîtrise du budget** semble globalement correcte, sauf pour 13 % des ménages. L'enquête qualitative avait soulevé un point de vigilance sur les travaux induits ou travaux d'aménagement pas toujours pris en compte dans les estimatifs de travaux, alors qu'ils demeurent nécessaires. Une attention particulière sur ce point doit être accordée aux ménages très modestes qui peuvent être mis en difficulté par un dépassement budgétaire même réduit.

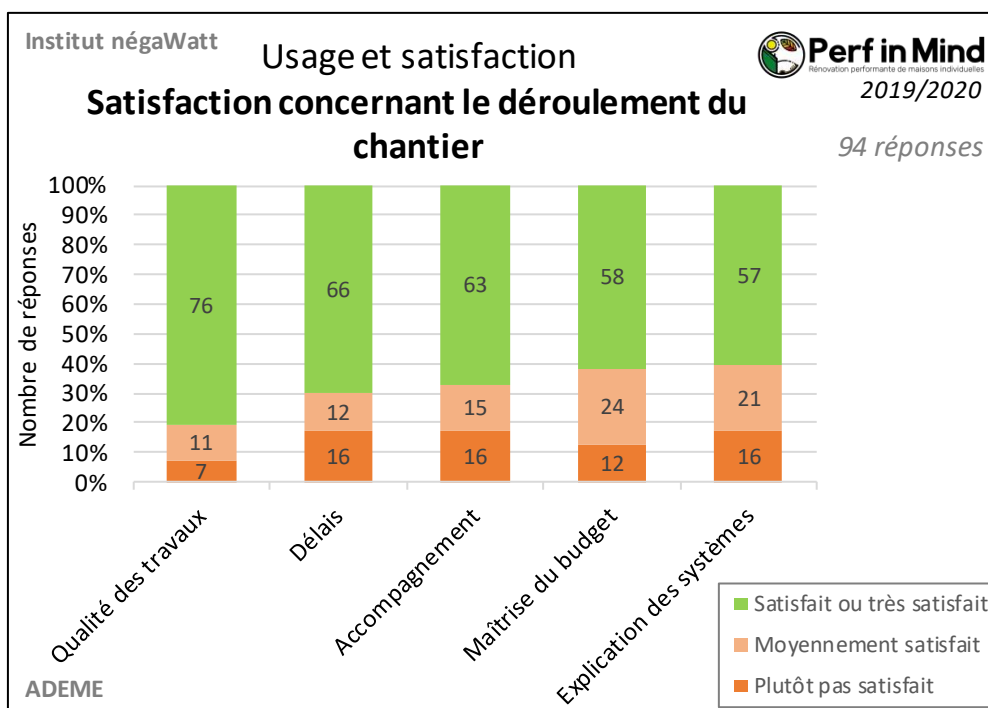


Figure 38 : Satisfaction concernant le déroulement du chantier

Quant à **l'explication du fonctionnement des systèmes** installés, elle est visiblement perfectible d'après ce questionnaire (seulement 61 % des ménages satisfaits), ce qui induit des difficultés d'appropriation du fonctionnement thermique du logement. 10 ménages sur 94 déclarent ne pas être à l'aise avec le réglage de l'installation de chauffage et 11 avec le réglage de l'installation de ventilation.

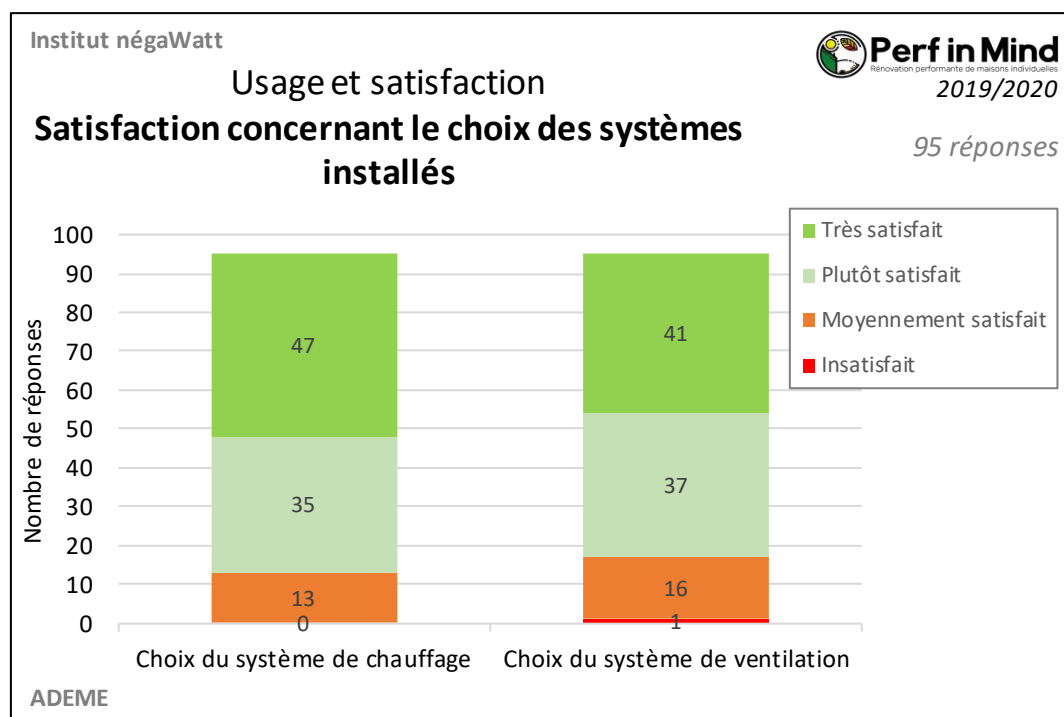


Figure 39 : Satisfaction concernant le choix des systèmes installés

Un temps d'explication pourrait être formalisé à travers un poste chiffré dans les devis d'artisans (éventuellement comme prestation offerte). Ce résultat confirme des éléments identifiés dans l'enquête qualitative sur l'appropriation des systèmes. Malgré cela, la satisfaction concernant le choix des systèmes installés pour le chauffage et la ventilation reste bonne : 86 % sont satisfaits des systèmes installés pour le chauffage et aucun n'est insatisfait. Pour la ventilation, 82 % sont satisfaits et un seul ménage se déclare insatisfait du système installé (voir figure ci-dessous).

Auto-réhabilitation

En complément sur la phase chantier, l'enquête quantitative montre que **l'auto-réhabilitation** est une réalité des chantiers de rénovation thermique (voir figure ci-dessous), et que cette pratique se combine avec les travaux réalisés par les artisans. Les 3/4 des ménages ont fait eux-mêmes les travaux de finition, et 1/4 ont réalisé des travaux plus techniques. Seuls 15 % des ménages enquêtés n'ont pas contribué physiquement au chantier. L'enquête qualitative avait permis de montrer que la pratique de l'auto-réhabilitation ne vise pas seulement la réduction du coût du chantier, souvent il s'agit d'une volonté de contribuer à la création de son habitat. La forte proportion d'auto-réhabilitation dans ces chantiers montre que cette pratique est compatible avec l'atteinte de la performance énergétique et peut s'articuler avec les aides financières dirigées vers les travaux réalisés par des artisans, les auto-réhabilitateurs se nourrissant par ailleurs de la présence de professionnels sur leurs chantiers (voir enquête qualitative).

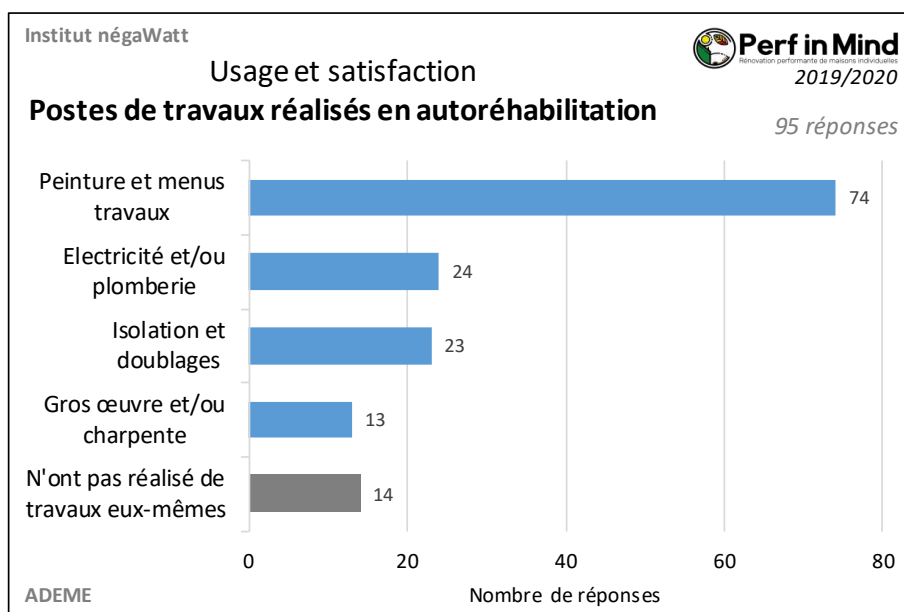


Figure 40 : Postes de travaux réalisés en auto-réhabilitation sur les 95 répondants

Cette réalité de l'auto-réhabilitation sera à conserver à l'esprit lors de l'analyse économique des projets au [chapitre 10](#).

Si c'était à refaire...

À la question « *Si c'était à refaire ?* », 35 ménages sur 95 soit 37 % referaient la même chose. Les autres répondants évoquent :

- Plus de vigilance dans le choix des entreprises
- Prendre un maître d'œuvre pour coordonner le chantier
- Une meilleure anticipation des surchauffes estivales
- Des choix techniques différents (ventilation ou chauffage)
- Un intérêt pour des solutions non retenues car coûteuses (solaire thermique)
- Un dimensionnement plus fin des émetteurs de chaleur (cas de surdimensionnement de poêle ou de radiateurs électriques)

Les réponses à cette question traduisent aussi **l'implication des ménages** dans ces travaux de rénovation et leur montée en compétence à travers le suivi du chantier et l'apprentissage des nouveaux systèmes. **Beaucoup se sont « pris au jeu » de la performance énergétique** (pour ceux qui n'y étaient pas sensibilisés avant ces travaux) et voient donc différentes pistes qui permettraient de pousser plus loin cette recherche de performance.

Certains regrettent une performance fondée sur des systèmes techniques complexes et auraient **préféré une stratégie « low tech »**. Typiquement c'est la ventilation double-flux qui est jugée peu « conviviale » par certains usagers, ce qui a été constaté et commenté dans l'enquête qualitative. Plus que la technologie de la VMC double-flux, ce sont les interfaces utilisateurs qui sont jugées difficiles d'accès. Le bruit, l'automatisation des changements de régime et leur impact sonore peuvent également être mal acceptés. Ces éléments sont perfectibles à travers le choix matériel, le soin apporté à l'installation sur le plan phonique, et l'accompagnement à la maîtrise d'usage.

NATURE DES TRAVAUX

Méthodologie : les données présentées dans cette partie proviennent principalement de la collecte de documents sur les travaux réalisés (à la différence de la partie précédente de [Présentation générale](#), largement issue du questionnaire).

Nous avons ainsi compilé dans un tableur de collecte unique les informations issues de sources diverses et de nature différente selon les dispositifs d'accompagnement. Nous avons ainsi analysé les Diagnostics initiaux et les calculs RT2005-réno justifiant le niveau BBC, mais aussi les « état des lieux architecturaux et techniques » réalisés par les artisans et formateurs Dorémi, les devis finaux, les factures.

En complément, nous avons compilé les tests d'infiltrométrie en cours de chantier et finaux, lorsqu'ils étaient disponibles. Pour les suivis « avancés », certaines informations ont été complétées ou vérifiées par les relevés sur site réalisés pendant l'instrumentation.

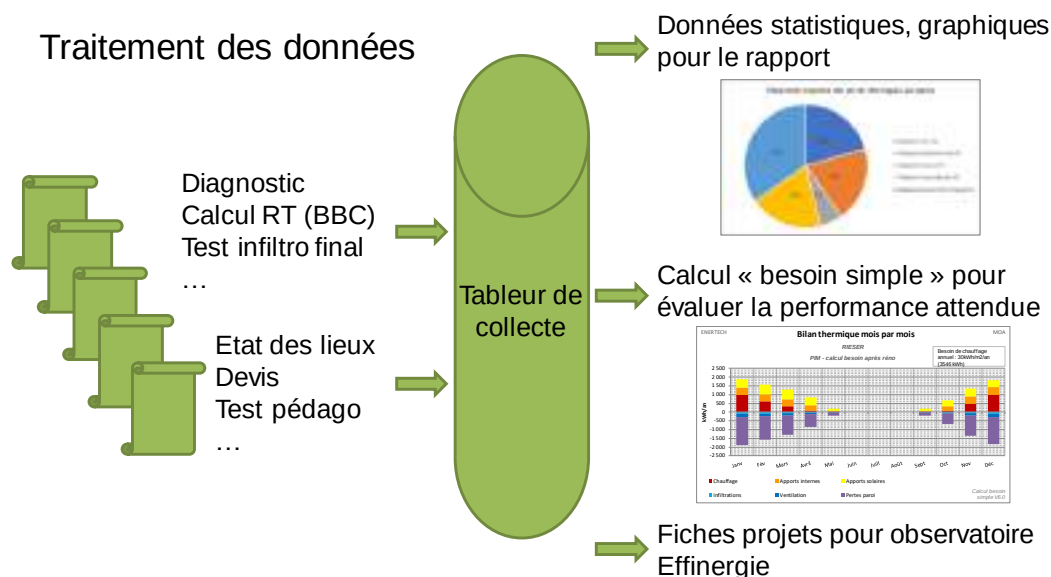


Figure 41 : Schéma de la structure de collecte et de traitement des données sur les 106 maisons suivies.

Cette analyse a fait apparaître de nombreuses contradictions entre les sources. Du diagnostic initial à la facture finale, en passant par plusieurs versions des devis, la nature des travaux a pu évoluer. C'est pourquoi, en cas de contradiction entre les sources, la source la plus récente a systématiquement été privilégiée. La collecte d'informations a donc nécessité un travail itératif de vérification et de fiabilisation des données. Dans certains cas, notamment pour fiabiliser la surface habitable (qui pour certaines maisons pouvait varier du simple au double selon les sources...), nous avons rappelé les participants pour préciser quels sont les espaces réellement chauffés et habités.

Ces données unifiées et fiabilisées ont alors été utilisées pour l'ensemble des analyses du rapport, ainsi que pour l'approche calculatoire du besoin de chauffage (voir [§4.3](#)) et pour alimenter des fiches opérations mises en ligne sur l'Observatoire BBC Effinergie (<https://www.observatoirebbc.org/perfinmind>).

2 Le bâti

2.1 Les murs

2.1.1 Solution de rénovation en fonction de la nature des murs existants

L'un des choix structurants d'isolation de l'enveloppe est celui d'isoler les murs par l'intérieur (ITI, isolation thermique par l'intérieur), par l'extérieur (ITE, isolation thermique par l'extérieur), ou encore combiner les deux.

Nous distinguerons ici les cas où les murs ont été :

- Isolés par l'extérieur (ITE),
- Majoritairement par l'extérieur mais aussi par l'intérieur, par exemple un mur sur rue, sur mitoyen, mais aussi une descente d'escalier intérieur ou un mur intérieur donnant sur un local non chauffé (ITE et ITI),
- Dans certains cas on associe sur un même mur une ITE et une ITI, l'un des deux isolants étant généralement existant avant rénovation. On notera ici ce cas ITE+ITI,
- Majoritairement par l'intérieur mais aussi par l'extérieur, souvent une façade particulière (ITI et ITE),
- Isolés par l'intérieur (ITI).

Les statistiques suivantes sont présentées sur 103 maisons, en effet sur 3 projets nous n'avons pas pu réunir des données fiables. Nous considérons d'abord l'ensemble des maisons, puis séparons les maisons par époque de construction avant 1948 (32 maisons) ou après (71 maisons) :

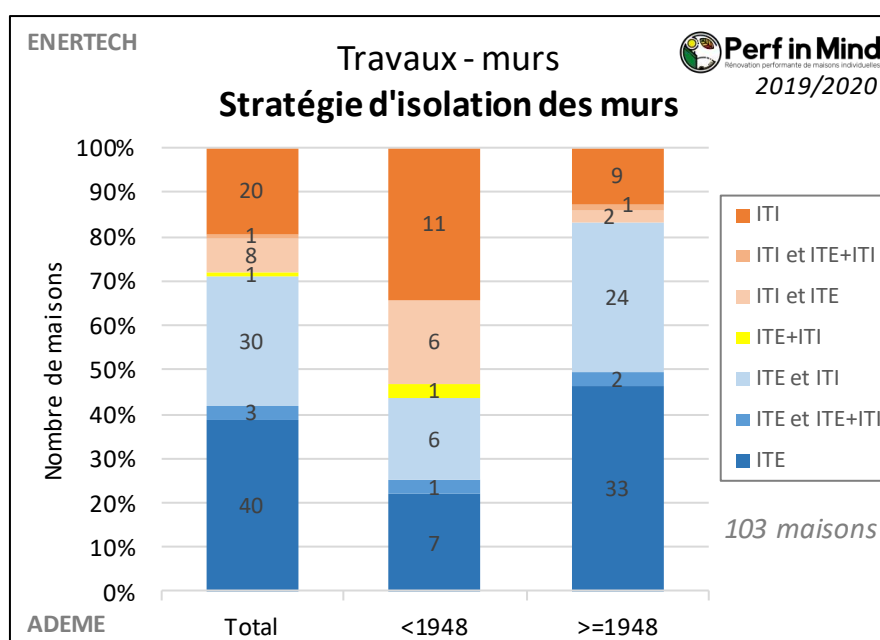


Figure 42 : Répartition des maisons par stratégie d'isolation des murs, par période constructive.

Un peu plus de 70% des maisons ont été isolées par l'extérieur ou principalement par l'extérieur. C'est un peu plus que la proportion constatée sur l'observatoire BBC Effinergie où il y a 58% d'ITE, 39% d'ITI et 2% d'ITE+ITI.

Cette proportion de maisons isolées par l'extérieur ou principalement par l'extérieur chute à moins de 50% pour les maisons d'avant 1948, alors qu'elle s'élève à plus de 80% pour les maisons d'après 1948.

Cette distinction par époque constructive s'explique d'autant mieux si on répartit les maisons par procédé constructif principal (par soucis de simplification nous avons regroupé les cas ITE+ITI avec les associations ITE et ITI etc.) :

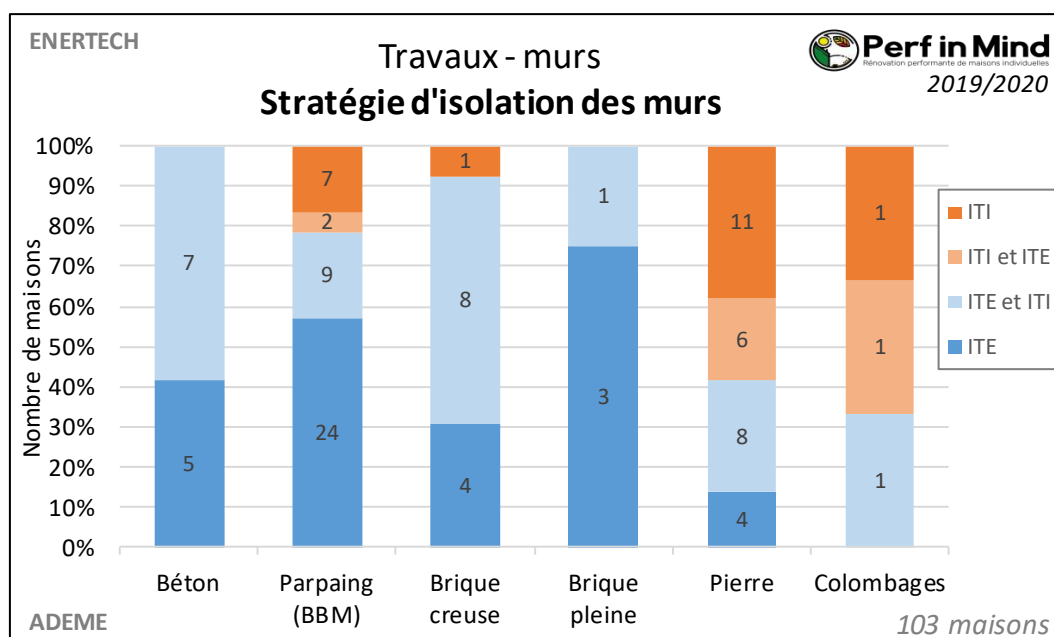


Figure 43 : Répartition des maisons par stratégie d'isolation des murs, par procédé constructif principal.

On voit sur ce graphique que l'ITI est privilégiée pour les murs en pierre, les murs à colombage, sans doute pour préserver l'aspect des façades. Elle est également utilisée pour d'autres modes constructifs plus récents comme les parpaings ou les briques creuses.

A noter que pour 4 maisons sur 103, une partie des murs n'a pas été isolée. Une maison comporte par ailleurs un mur à ossature bois pour une extension créée lors de la rénovation.

2.1.2 Isolants mis en œuvre suivant les types d'isolation en maisons individuelles

Les maisons suivies présentent une large variété d'isolants dans les murs.

La Figure 44 ci-dessous présente la proportion des surfaces « utiles » isolées avec les différents isolants. Par surface « utile » on entend ici les surfaces thermiquement déperditives, c'est-à-dire séparant l'intérieur du logement de l'extérieur ou d'un volume non chauffé. N'est pas comptabilisé comme surface « utile » l'isolation des pignons d'un comble perdu, celle des murs extérieurs d'une pièce non chauffée elle-même isolée du volume chauffé, etc.

On observe que **49% des ITE sont réalisées en polystyrène**, principalement du polystyrène expansé (PSE). 21% sont en laine de roche, et 19% en laine de bois. Au total 20% des isolants utilisés en ITE sont biosourcés.

En ITI, ce sont les laines minérales qui sont les plus utilisées, avec 39% dont principalement de la laine de verre. 26% sont en laine de bois, 9% en ouate de cellulose et 9% en laine « Trio » (mélange de chanvre, coton et lin). Au total 45% des isolants utilisés en ITI sont biosourcés.

Les tendances sont comparables à celles constatées sur l'observatoire BBC Effinergie avec la prédominance des « plastiques alvéolaires » (soit notamment le polystyrène et le polyuréthane) en ITE et

des laines minérales en ITI (Source : « Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles » d'Avril 2021).

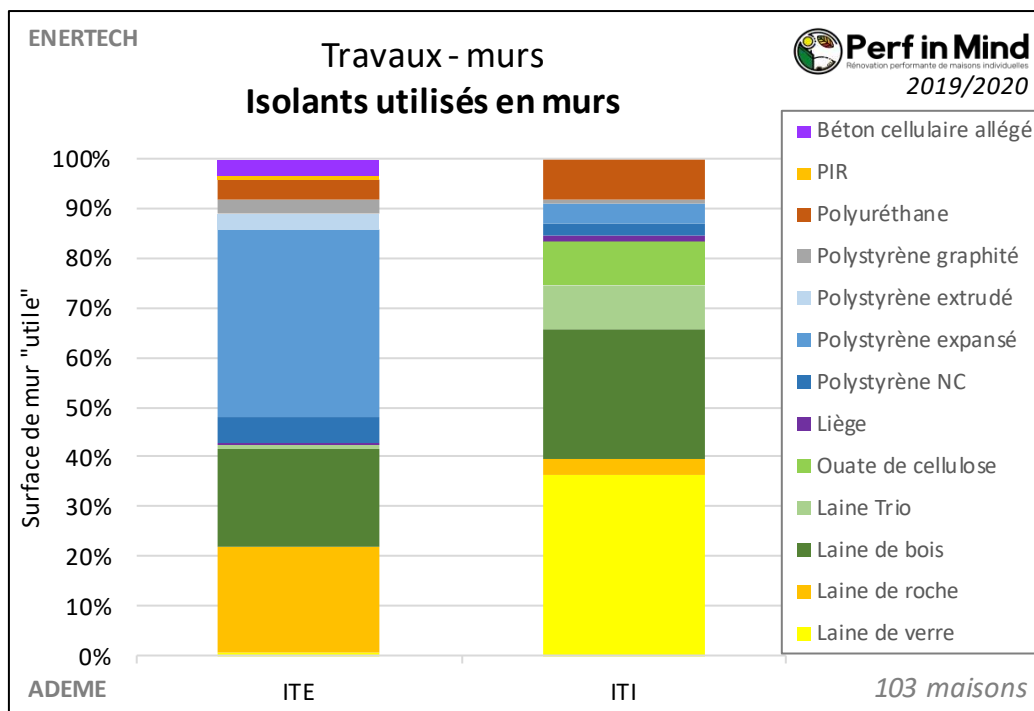


Figure 44 : Répartition des isolants utilisés en ITI et en ITE.

Comme nous l'avons vu précédemment, c'est la nature du mur plus que la période constructive qui influe sur la conception de l'isolation des murs. En effet c'est sur ce critère que l'on observe une variation la plus importante des parts d'isolants utilisés. Ainsi, si on se concentre sur les seules maisons en pierre et en colombage, on observe les proportions suivantes :

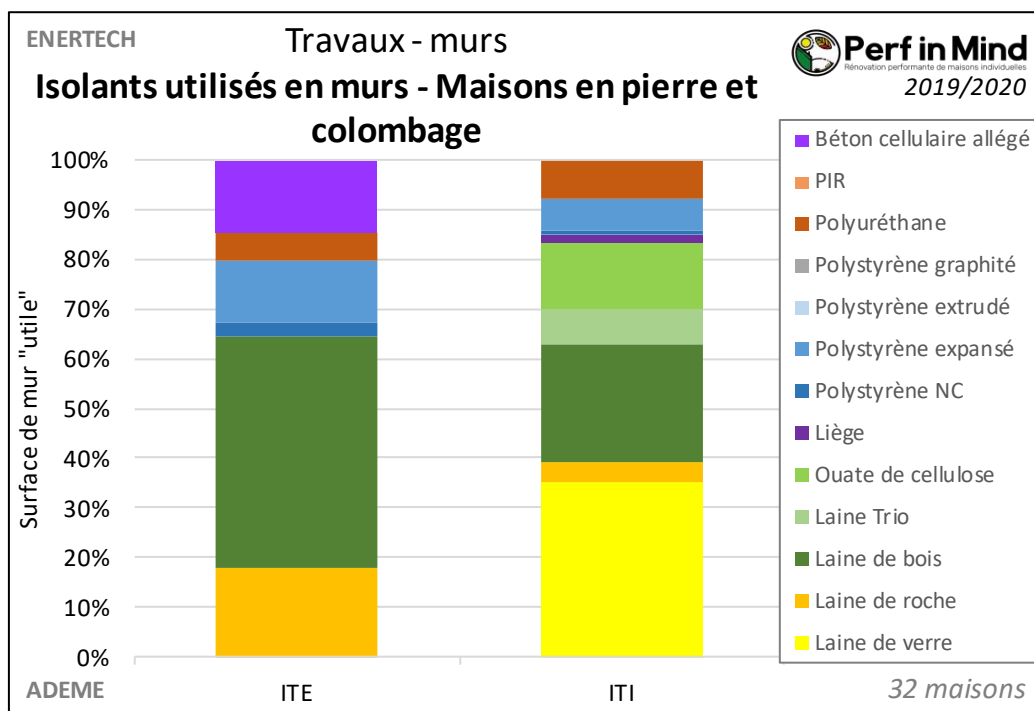


Figure 45 : Répartition des isolants utilisés en ITI et en ITE, pour les maisons en pierre (29) et en colombage (3).

Pour ces maisons l'**usage du polystyrène chute** à 16% des surfaces isolées en ITE et à 7% en ITI.

En effet, ces isolants sont peu adaptés à ces murs, car d'une part leur pose exige une grande planéité du support, et d'autre part ces murs entre autres ont besoin de conserver un fort potentiel de séchage, donc il est recommandé de privilégier des isolants **ouverts à la migration de vapeur** (comme les laines et ouates), et si possible capillaires (comme les biosourcés sauf le liège et le béton cellulaire) dans la plupart des cas. Pour plus d'information sur le bon choix des isolants en prenant en compte la migration de vapeur, voir le rapport « Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien » disponible sur le [site d'Enertech](#).

En ITE la part de la laine de bois atteint une part de 46%, et la laine de roche 18%. On note aussi une opération avec une ITE en béton cellulaire allégé qui représente 15% des surfaces.

En ITI la laine de verre représente toujours 35% des surfaces, la laine de bois 24%, la ouate de cellulose 13% et la laine Trio 7%. Le polyuréthane est utilisé dans 8% des cas.

2.1.3 Performance de l'isolation

La performance des isolants s'exprime en résistance thermique dite « R ». Plus cette valeur est grande, plus l'isolation est performante.

Nous nous intéresserons ici à la performance de l'isolation principale des maisons, c'est-à-dire l'isolation dont la surface est la plus grande pour une maison donnée. Ce choix est justifié par le souhait de ne pas perturber les statistiques par des isolants annexes comme ceux entre le logement et les locaux non chauffés, isolation des descentes d'escaliers etc.

Les statistiques sur la résistance thermique de l'isolant principal ajouté au mur existant sont présentées dans le graphique suivant :

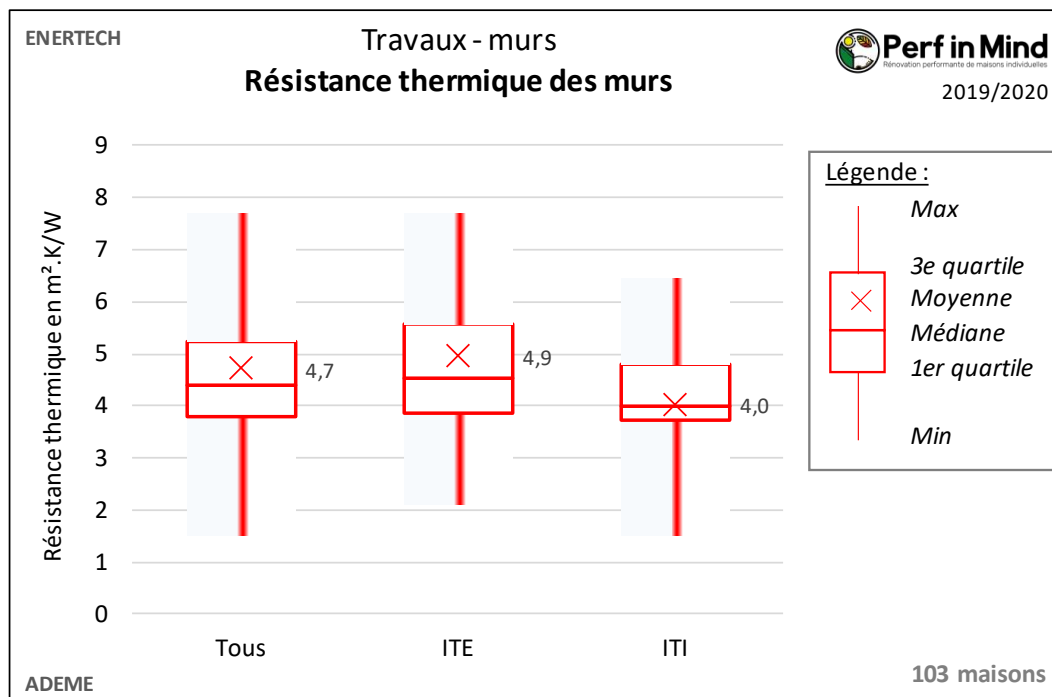


Figure 46 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la résistance thermique de l'isolant principal des murs, au global et en différenciant l'isolation par l'extérieur et par l'intérieur.

La performance moyenne de l'**isolation des murs est de $R=4,7 \text{ m}^2.K/W$** (résistance thermique de l'isolant). Celle-ci monte à 4,9 dans le cas des ITE, et descend à 4,0 pour les ITI.

On note que le 1^{er} quartile est toujours supérieur à $3,7 \text{ m}^2.K/W$, c'est-à-dire que plus des trois quarts des maisons ont opté pour **un niveau d'isolation rendant les travaux éligibles aux aides et financements** (crédit d'impôt, CEE, TVA réduite, prêt à taux zéro etc.).

Les valeurs minimales descendant jusqu'à un $R=1,5 \text{ m}^2.K/W$ sont vraisemblablement des isolations existantes conservées lors de la rénovation sans sur-isolation.

La différence de résistance thermique entre ITE et ITI constatée [Figure 46](#) peut sans doute s'expliquer par une volonté de **limiter l'épaisseur de l'isolant** intérieur, qui réduit la surface habitable. Le graphique suivant présente les statistiques sur les épaisseurs d'isolants mis en œuvre sur les murs principaux :

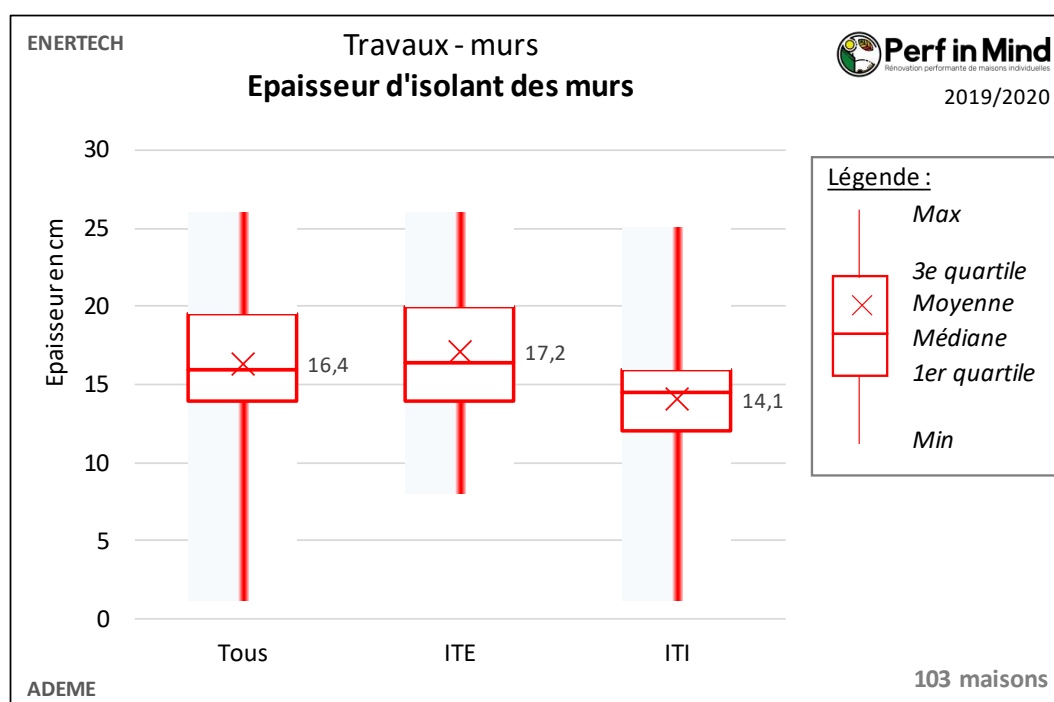


Figure 47 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de l'épaisseur de l'isolant principal des murs, au global et en différenciant l'isolation par l'extérieur et par l'intérieur.

On observe en effet des épaisseurs d'isolant plus faibles en ITI qu'en ITE avec 14 cm en moyenne en ITI contre 17 cm en moyenne en ITE.

Il est intéressant de constater que l'écart entre le 1^{er} et le 3^e quartile n'est que de 6cm en ITE et de 4cm en ITI. C'est-à-dire que les efforts de conception et d'optimisation des épaisseurs d'isolant par le calcul le cas échéant, ne jouent dans la majorité des cas que sur quelques cm de plus ou de moins. **Soit pour l'économie du projet une variation du coût marginal de l'isolation de quelques € par m² de mur...** En effet le coût d'une ITI ou d'une ITE est principalement liée à son parement (plaque de plâtre et son ossature, enduit) et à sa mise en œuvre (échafaudage, fixations, découpes) qui dépendent peu de l'épaisseur. Seule la fourniture de l'isolant lui-même dépend de son épaisseur, et son poids marginal n'est que de 1 à 2 €/m².

On note Figure 46 que la moyenne de résistance thermique est supérieure ($R=4,7 \text{ m}^2.\text{K/W}$) à celle constatée sur l'Observatoire BBC Effinergie ($R=4,2 \text{ m}^2.\text{K/W}$). Afin d'identifier les rénovations BBC, nous allons répartir les maisons par mode de définition de la performance visée (voir aussi à ce sujet le §1.3.2, en distinguant :

- La définition du BBC-rénovation, basée sur un calcul RT2005-réno, notée ici « **BBC** » (concerne ici 59 maisons),
- L'approche par bouquet de travaux pré-calculés visant une consommation de chauffage de $50 \text{ kW.h/m}^2/\text{an}$ en moyenne en France, dites Solutions Techniques de Rénovation, notée ici « **STR** » (concerne ici 32 maisons),
- Et l'objectif de rénovation à énergie positive, dans le cadre de la démarche EnergieSprong, notée ici « **E+** » (concerne ici une opération de 12 maisons en bande).

Les statistiques sur les résistances thermiques additionnelles des murs principaux sont présentées dans le graphique suivant :

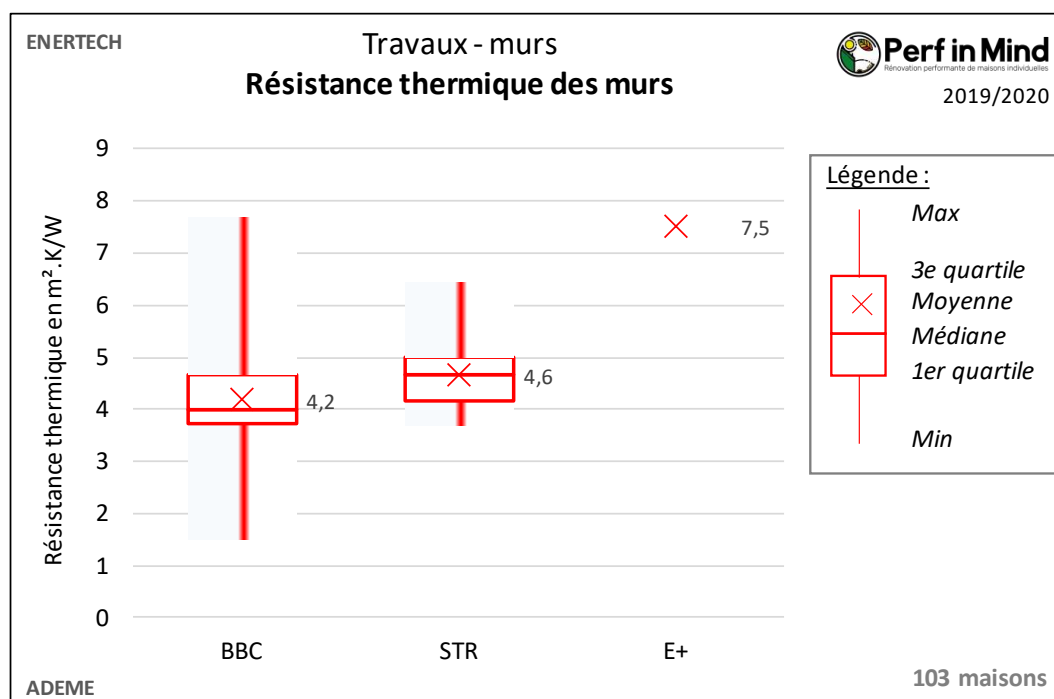


Figure 48 : Graphique « boîte à moustache » (voir le Glossaire) de la résistance thermique de l'isolant principal des murs, selon le mode de définition de la performance visée.

Les statistiques pour les rénovations BBC sont alors comparables à celles de l'Observatoire BBC Effinergie pour les maisons individuelles rénovées :

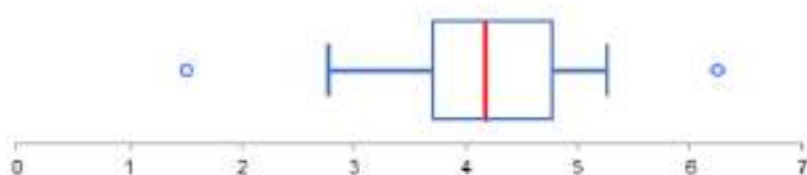


Figure 49 : Déciles, Quartiles, Médiane de la résistance des murs extérieurs en maisons individuelles après travaux.
Source : « Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles » d'Avril 2021.

La moyenne de résistance thermique de l'isolant des murs est identique à $R=4,2 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, ainsi que le premier quartile ($R=3,7$), et le troisième quartile est proches ($4,7$ ici et $4,8$ dans l'Observatoire). **L'échantillon de 59 maisons rénovées BBC semble donc représentatif de la généralité des maisons rénovées BBC, en ce qui concerne les murs.**

En comparaison, on note une plus forte isolation pour les rénovations définies avec les STR ($R=4,6$ en moyenne), tandis que les rénovations à énergie positives ont été conçues avec un $R=7,5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.

On peut également s'interroger de l'impact de la rigueur du climat sur le niveau d'isolation. Pour cela, nous avons distingué l'objectif de Cep (consommation d'énergie primaire sur 5 postes, principal indicateur de la définition du BBC) des maisons. Il reflète en effet la rigueur de la zone climatique et l'effet de l'altitude (par tranche de 0 à 400m, de 400 à 800m et supérieure à 800m).

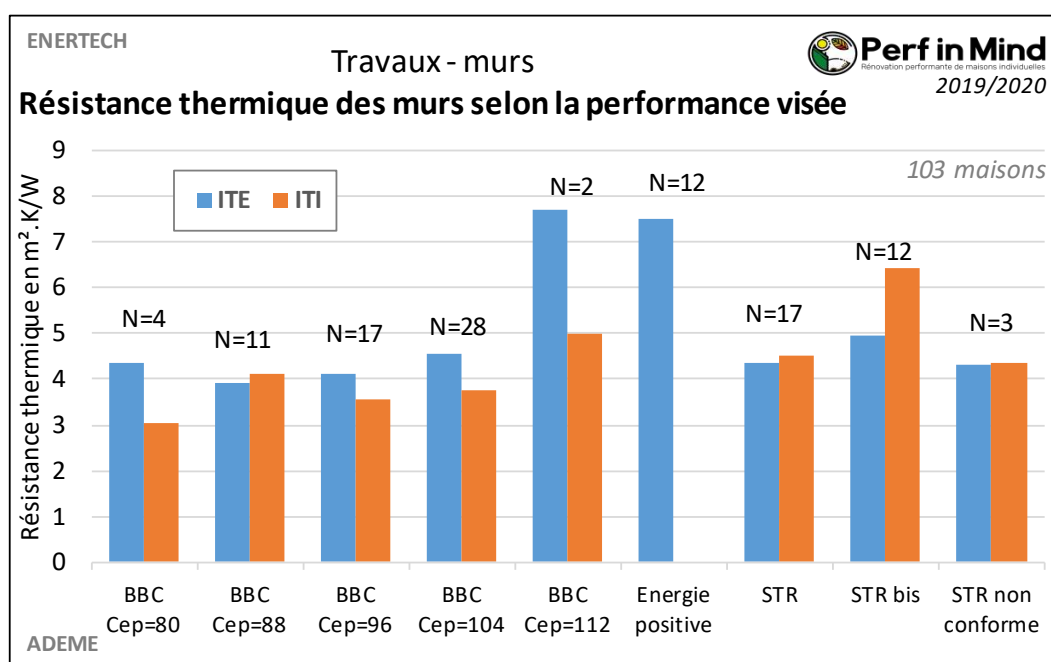


Figure 50 : Graphique de la résistance thermique moyenne de l'isolant principal des murs, selon la performance visée, et en distinguant ITE et ITI.

Pour les opérations BBC, on semble constater une corrélation de la résistance thermique des murs avec la rigueur du climat. En effet, plus le Cep visé est élevé, c'est-à-dire **plus le climat est froid, plus les résistances thermiques sont importantes en ITI comme en ITE.**

Sur ce même graphique, nous avons également distingué les STR classiques et la variante prévue lorsqu'il n'est pas possible d'isoler le plancher bas : dans ce cas il est prévu d'isoler la dalle basse en périphérie (notamment en enterrant l'ITE le cas échéant) et de renforcer la résistance thermique des murs. La bonne application de cette règle est visible sur la résistance moyenne des murs de ces STR « bis ». On note cependant au passage 3 STR non conformes au référentiel Dorémi, séparées pour ne pas fausser les statistiques des STR conformes.

2.2 La toiture

2.2.1 Solution de rénovation de la toiture

Plusieurs techniques d'isolation de la toiture sont représentées parmi les maisons suivies :

- L'isolation en comble perdus est utilisée en toiture principale dans 47% des maisons,
- L'isolation sous rampant est utilisée en toiture principale dans 37% des maisons,
- L'isolation en sarking, c'est-à-dire au-dessus de la charpente existante, parfois en combinaison avec une isolation sous rampant, est utilisée en toiture principale dans 17% des cas,
- L'isolation de toiture terrasse n'a pas été utilisée en toiture principale, et n'est présente que sur des toitures secondaires de 4 opérations.

Bien que moins marquée, cette tendance est comparable à celle de l'Observatoire BBC d'Effinergie, où les combles perdus (34%) sont moins nombreux que les rampants (isolation sous rampants et sarking, 57%) (Source : « Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles » d'Avril 2021, disponible sur <https://www.observatoirebbc.org/publications/renovation>)

Le graphique suivant présente les techniques d'isolations utilisées sur les toitures principales, avec la mention « et autre » si une autre technique a été utilisée sur une toiture secondaire :

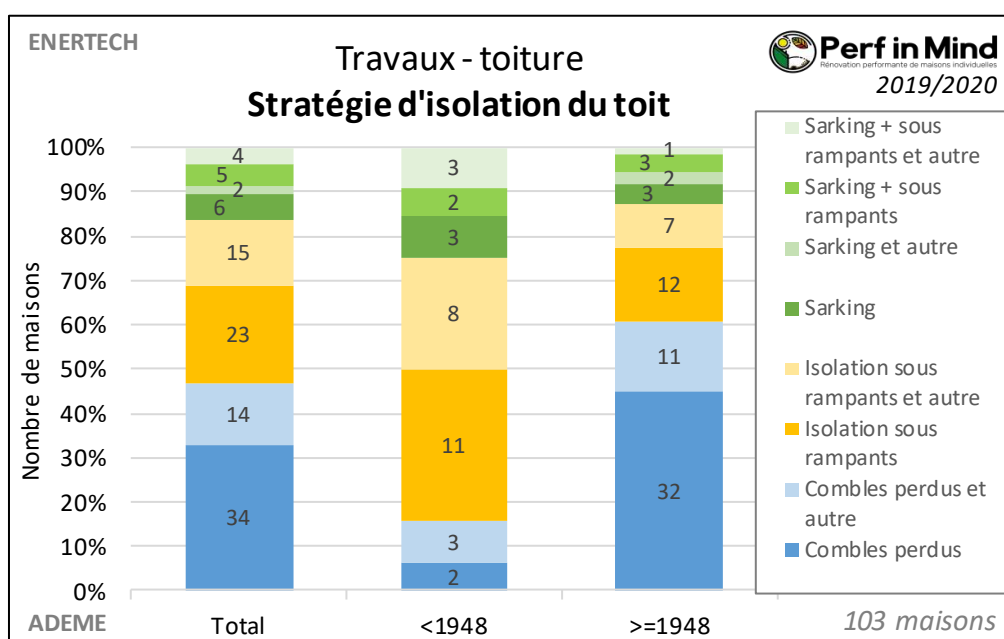


Figure 51 : Répartition des maisons par technique d'isolation de la toiture principale, globalement et par période constructive.

La distinction par période constructive permet d'identifier le fait que les maisons d'avant 1948 ont moins souvent été isolées en comble perdus. Sur ces maisons, les combles sont vraisemblablement aménagés la plupart du temps. La proportion d'isolation sous rampant et de sarking est comparable pour les autres maisons (deux fois plus d'isolation sous rampant que de sarking).

2.2.2 Isolants mis en œuvre suivant les types d'isolation en maisons individuelles

Les isolants utilisés en toiture dépendent fortement du type de mise en œuvre.

Le graphique suivant présente les isolants utilisés selon le procédé d'isolation, en proportion des surfaces isolées.

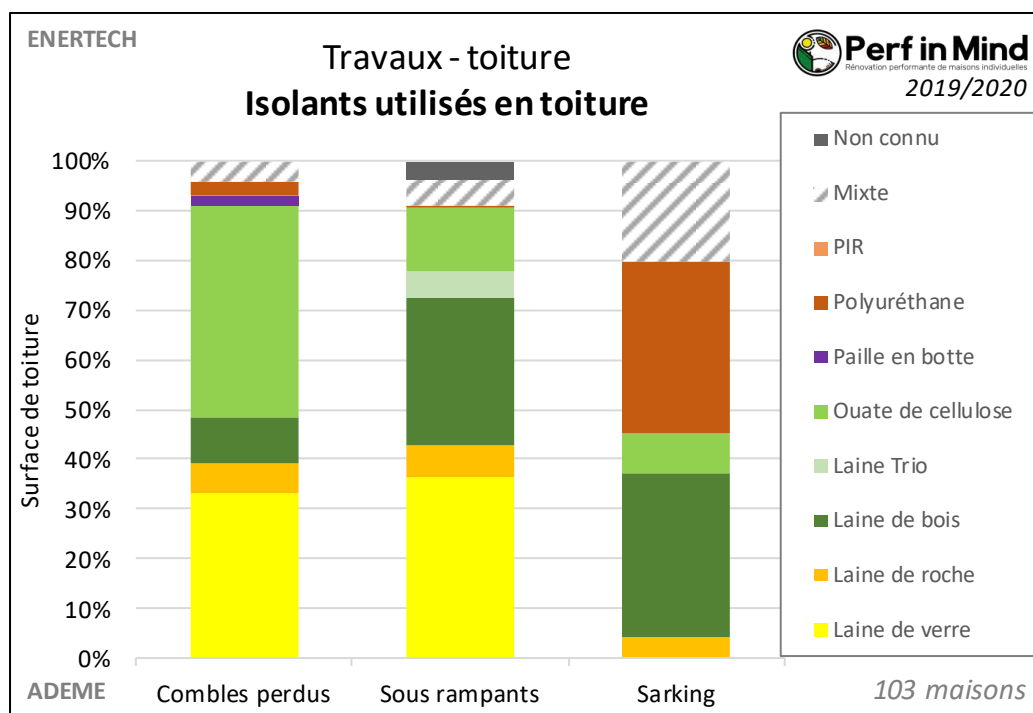


Figure 52 : Répartition des isolants utilisés par technique d'isolation.

En **combles perdus**, la ouate de cellulose est la plus utilisée, avec 42% des surfaces. Viennent ensuite la laine de verre (33%), la laine de bois (9%) et la laine de roche (6%). Une opération a été isolée en botte de pailles. Au total les biosourcés ont été utilisés dans 54% des cas.

En **isolation sous rampants**, c'est la laine de verre qui est la plus utilisée, avec 36% des surfaces. La laine de bois vient ensuite avec 30%, puis la ouate de cellulose avec 13% et la laine de roche avec 6% et la laine Trio (mélange de chanvre coton et lin) avec 5%. Au total les biosourcés ont été utilisés dans 48% des cas.

En **sarking**, c'est le polyuréthane qui représente le plus de surfaces isolées, avec 34%. La laine de bois est très proche avec 33%. La ouate de cellulose vient ensuite avec 8% puis la laine de roche avec 4%. Au total les biosourcés ont été utilisés dans 41% des cas.

La tendance à une présence forte d'éco-matériaux rejoint le constat de l'Observatoire BBC d'Effinergie.

2.2.3 Performance de l'isolation

Les statistiques sur la résistance thermique des isolants mis en œuvre sont présentées dans le graphique suivant :

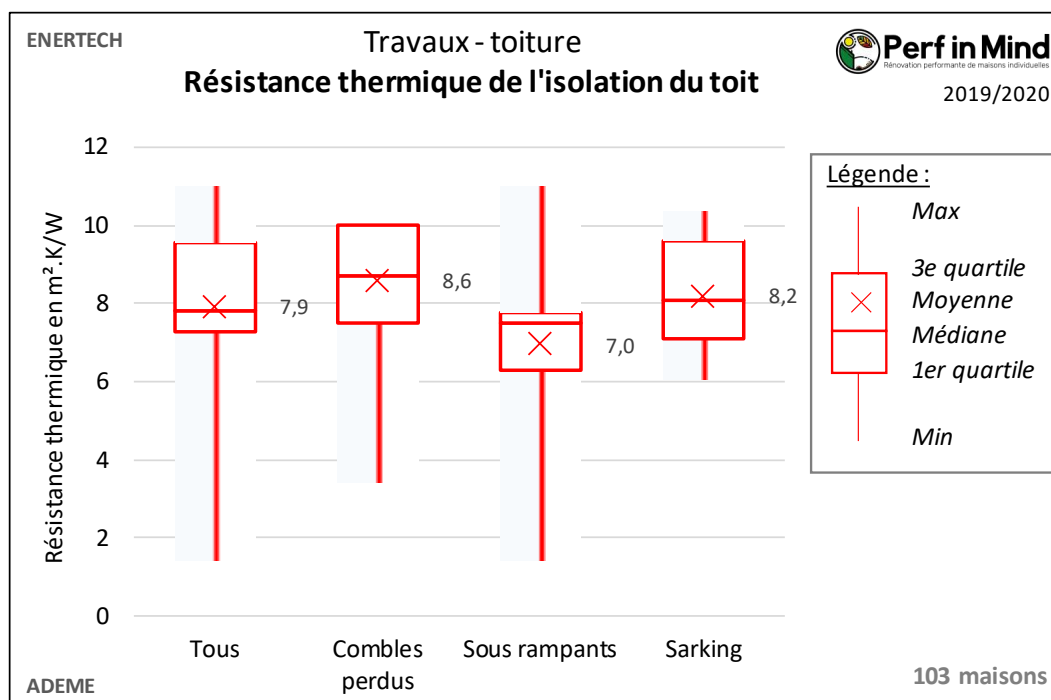


Figure 53 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la résistance thermique de l'isolant principal des toitures, au global et en différenciant les techniques de mise en œuvre.

La performance moyenne de **l'isolation des toitures est de $R=7,9 \text{ m}^2.\text{K/W}$** (résistance thermique de l'isolant). Celle-ci monte à 8,6 dans le cas des combles perdus, et descend à 7,0 pour les isolations en rampant, sans doute pour minimiser la perte de hauteur sous plafond et donc de surface habitable, et remonte à 8,2 en sarking.

On note que le 1^{er} quartile est toujours supérieur à $6,0 \text{ m}^2.\text{K/W}$, qui est la performance minimale pour rendre **les travaux éligibles aux aides et financements** (crédit d'impôt, CEE, TVA réduite, prêt à taux zéro etc.). Ainsi plus des trois quarts des isolations sous rampant ont pu bénéficier de ces aides. Cette proportion monte même à plus de 95% pour les isolations en comble perdus et en sarking.

A noter que la valeur minimale à $R=1,4 \text{ m}^2.\text{K/W}$ (4cm d'isolant...) est une isolation existante conservée en l'état sans être sur-isolée, ce qui nous semble une décision surprenante, mais qui a tout de même été validée par le calcul BBC.

L'épaisseur d'isolant est un paramètre important dans la conception de l'isolation de la toiture. Sous rampants, cette épaisseur réduit la hauteur sous plafond et bien souvent la surface habitable. En sarking au contraire, cette épaisseur va modifier la hauteur de faîtage, qui peut être refusée notamment en secteur protégé au titre des monuments historiques. Seule l'isolation des combles perdus n'a que peu de contrainte sur l'épaisseur d'isolant.

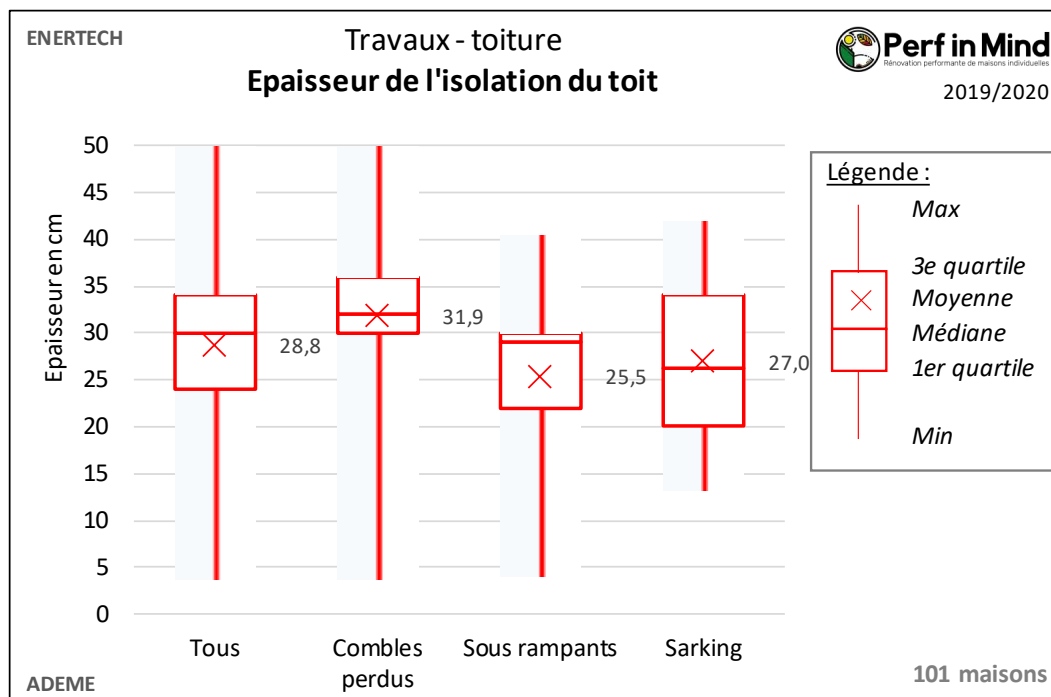


Figure 54 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de l'épaisseur de l'isolant principal des toitures, au global et en différenciant les techniques de mise en œuvre.

On note Figure 53 que la moyenne de résistance thermique est supérieure à celle constatée sur l'Observatoire BBC Effinergie qui est de $R=7,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Afin d'identifier les rénovations BBC, nous allons répartir les maisons par mode de définition de la performance visée, en distinguant comme pour les murs l'approche par le calcul BBC notée BBC, l'approche par bouquet de travaux dits STR, et l'objectif de rénovation à énergie positive notée E+ :

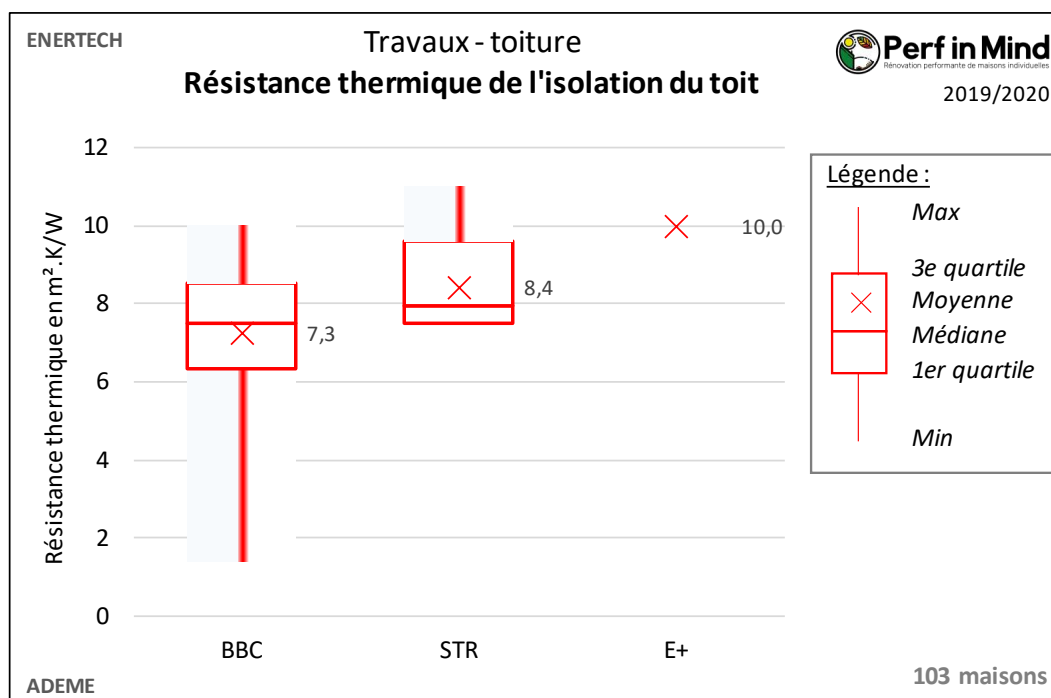


Figure 55 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la résistance thermique de l'isolant principal des toitures, selon le mode de définition de la performance visée.

Les statistiques pour les rénovations BBC sont alors comparables à celles de l'Observatoire BBC Effinergie pour les maisons individuelles rénovées :



Figure 56 : Déciles, Quartiles, Médiane de la résistance des toitures en maisons individuelles après travaux.

Source : « Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles » d'Avril 2021.

La moyenne de résistance thermique de l'isolant des murs est proche à $R=7,3$ contre $R=7,2 \text{ m}^2.\text{K/W}$, ainsi que le premier quartile ($R=6,4$ ici contre $R=5,9 \text{ m}^2.\text{K/W}$) et le troisième quartile ($R=8,5$ contre $R=8,3 \text{ m}^2.\text{K/W}$). **L'échantillon de 59 maisons rénovées BBC semble donc assez représentatif de la généralité des maisons rénovées BBC, en ce qui concerne les toitures.**

En comparaison, on note une plus forte isolation pour les rénovations définies avec les STR ($R=8,4$ en moyenne), tandis que les rénovations à énergie positives ont été conçues avec un $R=10 \text{ m}^2.\text{K/W}$.

On peut également s'interroger de l'impact de la rigueur du climat sur le niveau d'isolation. Pour cela, comme pour les murs, nous avons distingué l'objectif de Cep des maisons rénovées BBC. Cet indicateur reflète en effet la rigueur de la zone climatique et l'effet de l'altitude :

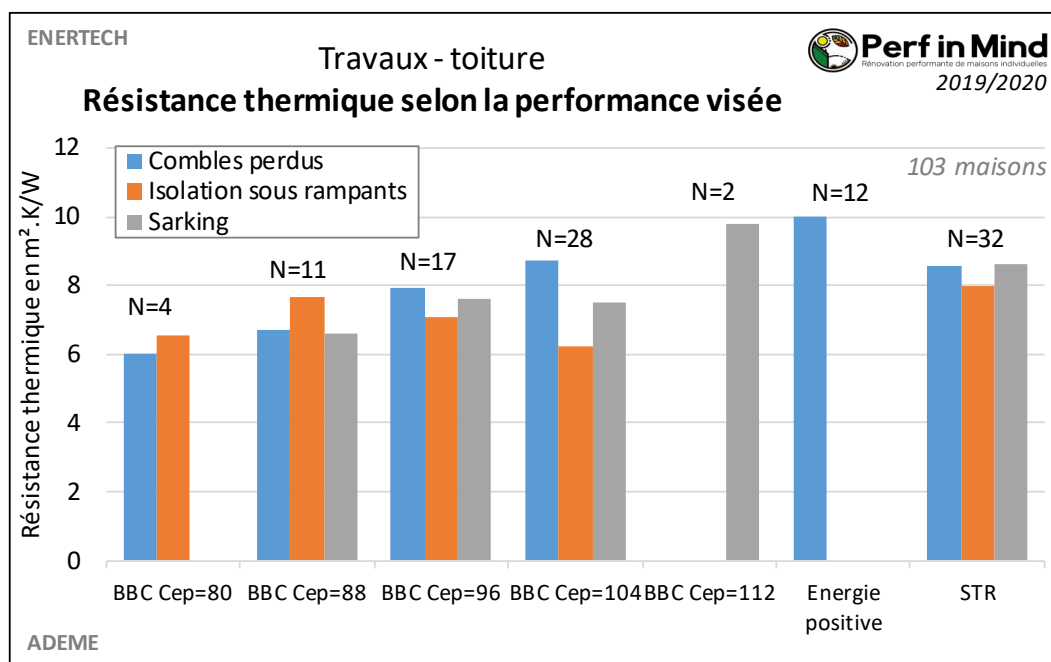


Figure 57 : Graphique de la résistance thermique moyenne de l'isolant principal des toitures, selon la performance visée, et en distinguant les techniques d'isolation.

Pour les opérations BBC, on semble constater comme pour les murs une corrélation de la résistance thermique des toitures avec la rigueur du climat. En effet, plus le Cep visé est élevé, c'est-à-dire **plus le climat est froid, plus les résistances thermiques mises en œuvre sont importantes, surtout en combles perdus**. La tendance est moins claire en isolation sous rampant, ce qui est logique vue la contrainte de hauteur sous plafond, mais elle semble présente également en sarking.

2.3 Le plancher bas

2.3.1 Solution de rénovation en fonction de l'existant

La possibilité et les techniques d'isolation du plancher bas dépendent fortement de la situation de cette paroi. En effet, il va être très compliqué d'isoler un plancher bas sur terre-plein, et souvent bien plus simple d'isoler un plancher bas donnant sur un local non chauffé comme un garage.

Le graphique suivant présente la situation des planchers pour l'ensemble des maisons, puis par période de construction :

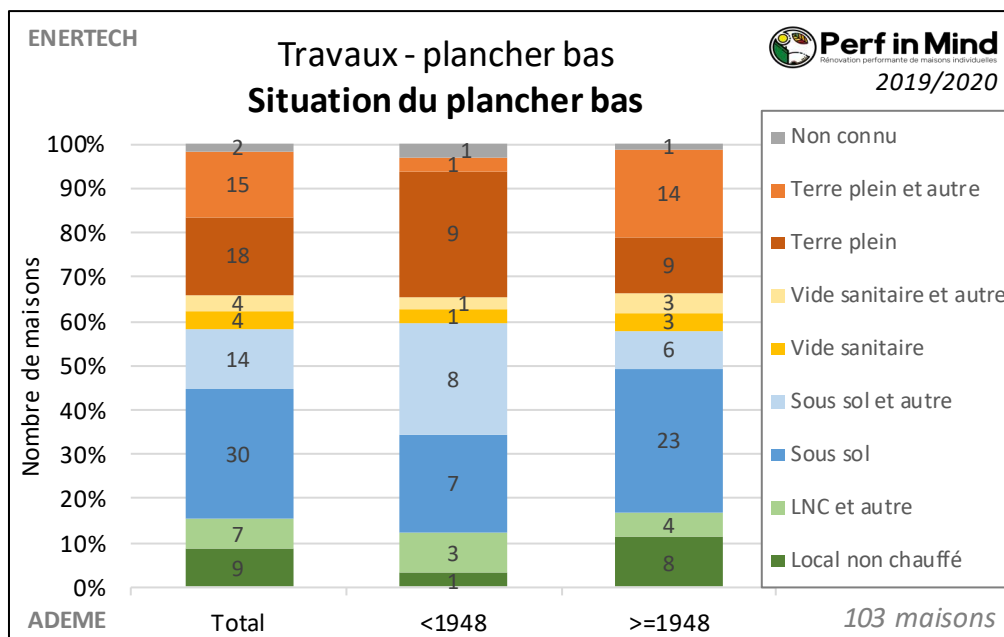


Figure 58 : Graphique de la situation du plancher bas des maisons suivies, globalement et par période constructive.

Pour 16% des maisons, le plancher bas donne sur un local non chauffé, et dans 43% des cas sur un sous-sol (au moins partiellement enterré). 8% des maisons disposent d'un vide sanitaire. Enfin, 32% des maisons ont un plancher bas sur terre-plein. Pour 2 maisons nous n'avons pas cette information.

Ces proportions sont comparables à celles de l'Observatoire BBC Effinergie, qui constate 55% de planchers bas sur sous-sol (incluant ce que nous désignons par Locaux non chauffés), 32% sur terre-plein, 4% sur vide sanitaire et aussi 7% sur l'extérieur (Source : « Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles » d'Avril 2021, disponible sur <https://www.observatoirebbc.org/publications/renovation>).

On n'observe pas de variation significative a priori entre les périodes constructives sur l'occurrence des différentes situations de plancher bas.

Les techniques d'isolation employées en réponse à la situation du plancher bas sont les suivantes. On se concentre ici sur le plancher bas principal, c'est-à-dire celui qui a la plus grande surface pour une maison donnée :

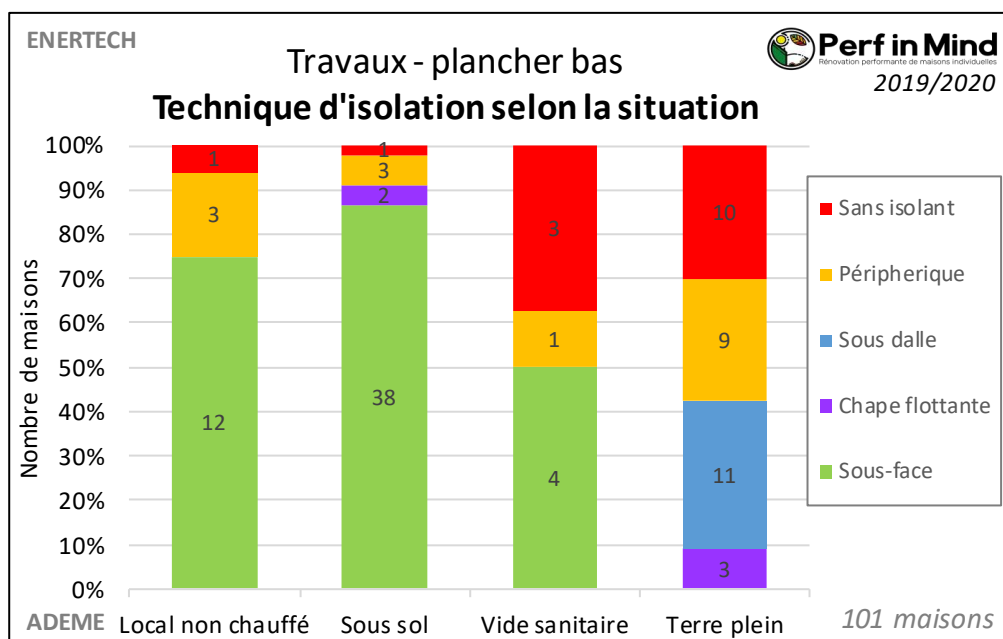


Figure 59 : Graphique des techniques d'isolation utilisées en réponse à la situation du plancher bas principal.

Les solutions adoptées sont très différentes selon la situation du plancher bas :

- L'isolation en sous-face est adoptée dans 75% des cas sur local non chauffé et 86% des cas sur sous-sol. Une isolation périphérique est utilisée dans 19% des cas sur local non chauffé.
- Dans le cas des planchers sur vide sanitaire, la part d'isolation en sous-face chute à 50%, probablement en raison de la difficulté d'accès. Une isolation périphérique est prévue pour 1 maison, et pour les 3 dernières le plancher bas n'a pas été isolé.
- Sur terre-plein, l'isolation en sous-face est évidemment impossible. 3 projets ont ajouté un isolant au-dessus de la dalle existante, recouvert par une chape flottante. Sur 11 projets une dalle a été coulée sur un isolant. Soit il n'y avait pas de dalle avant rénovation (cave en terre battue...) soit la dalle existante a été démolie. Pour 9 maisons le plancher bas a été isolé en périphérie, et enfin pour 10 maisons le plancher bas n'a pas été isolé du tout.

Pour 15 maisons au total sur 101, le plancher bas principal n'a pas été isolé, ni sur sa surface ni en périphérie.

2.3.2 Isolants mis en œuvre suivant les types d'isolation en maisons individuelles

Les isolants utilisés dépendent de leur technique de mise en œuvre, notamment pour des raisons de résistance à la compression pour les isolants sous chape ou sous dalle.

Le graphique suivant présente les isolants utilisés en fonction de la technique :

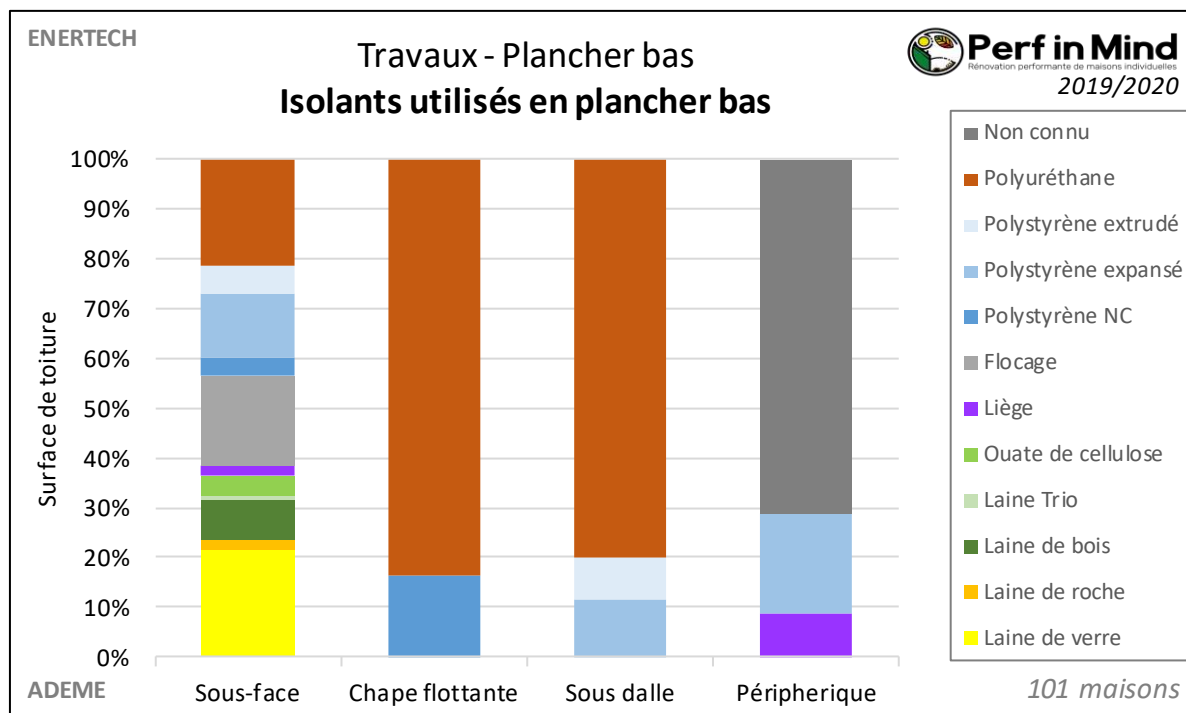


Figure 60 : Répartition des isolants utilisés par technique d'isolation.

L'isolation en sous-face a été réalisée avec une large diversité d'isolants. Les plus utilisés sont les polystyrènes (22%), la laine de verre (21%), le polyuréthane (21%), le flocage (18%). Vient ensuite la laine de bois (8%) et la ouate de cellulose (4%). Avec le liège et l'isolant Trio (mélange chanvre coton et lin), les biosourcés ne représentent que 15% des isolants utilisés.

Sous chape et sous dalle, c'est le polyuréthane qui est le plus utilisé (respectivement 84% et 80%), sans doute pour limiter l'épaisseur. L'autre type d'isolant utilisé est le polystyrène.

En isolation périphérique, l'isolant utilisé n'est pas connu dans beaucoup de cas. Quand il est connu, c'est le polystyrène et le liège qui sont cités.

2.3.3 Performance de l'isolation

Les statistiques sur les performances des isolants utilisés sont présentées dans le graphique Figure 61.

La performance moyenne de **l'isolation du plancher bas est de $R=3,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$** (résistance thermique de l'isolant). Celle-ci monte à 3,7 dans le cas des isolations en sous-face, et descend légèrement à 3,3 pour les isolations sous chape flottante ou sous dalle. Cette tendance reflète sans doute le souci de minimiser l'épaisseur dans ce cas, mais la faible diminution nous semble traduire une volonté de bien isoler, tant qu'à faire d'entreprendre des travaux aussi lourds.

On note que le 1^{er} quartile est de $3,0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, qui est la performance minimale pour rendre **les travaux éligibles aux aides et financements** (crédit d'impôt, CEE, TVA réduite, prêt à taux zéro etc.). Ainsi les trois quarts des isolations de plancher bas ont pu bénéficier de ces aides.

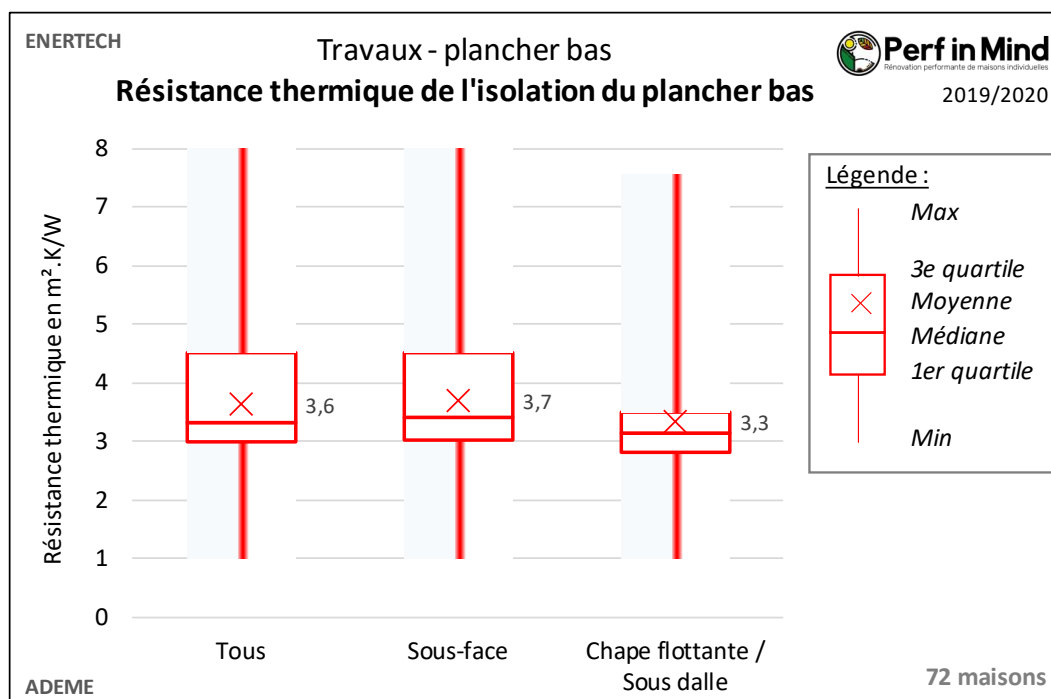


Figure 61 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la résistance thermique de l'isolant principal du plancher bas, au global et en différenciant les techniques de mise en œuvre.

On se souvient par ailleurs que pour 15 maisons sur 101, le plancher bas principal n'est **pas isolé**, et qu'une **isolation périphérique** a été mise en œuvre pour 16 maisons. Ces choix concernent principalement les planchers bas sur terre-plein et sur vide sanitaire (voir la [Figure 59](#)).

L'épaisseur d'isolant est un paramètre important dans la conception de l'isolation du plancher bas. Sous la dalle, elle réduit la hauteur disponible dans un local non-chauffé ou un sous-sol, avec parfois des contraintes comme la porte de garage basculante, ou encore dans un vide sanitaire. Au-dessus de la dalle comme sous chape, elle réduit la hauteur sous plafond et nécessite de revoir toutes les portes intérieures voire les portes extérieures et portes-fenêtres. Si une dalle est réalisée ou refaite, l'épaisseur d'isolant va nécessiter de décaisser plus profond pour ne pas réduire la hauteur sous plafond. Dans tous les cas on voit que cette hauteur est contraignante.

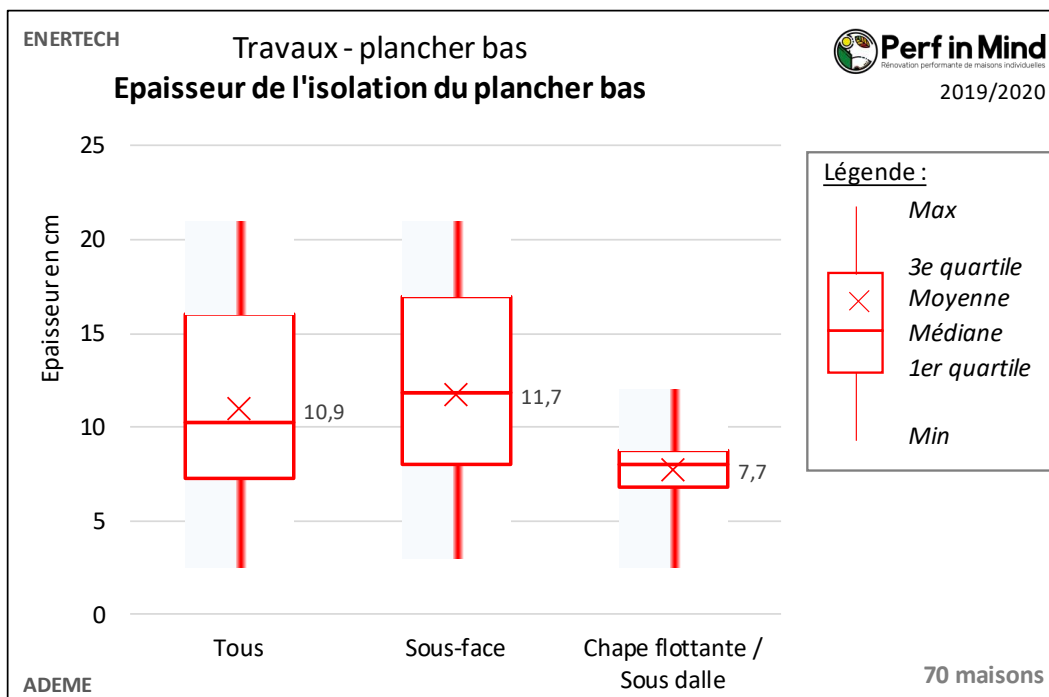


Figure 62 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de l'épaisseur de l'isolant principal du plancher bas, au global et en différenciant les techniques de mise en œuvre.

On note Figure 61 que la moyenne de résistance thermique est identique à celle constatée sur l'Observatoire BBC Effinergie ($R=3,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$). Afin d'identifier les rénovations BBC, nous allons répartir les maisons par mode de définition de la performance visée, en distinguant comme pour les murs l'approche par le calcul BBC notée BBC, l'approche par bouquet de travaux dits STR, et l'objectif de rénovation à énergie positive notée E+ :

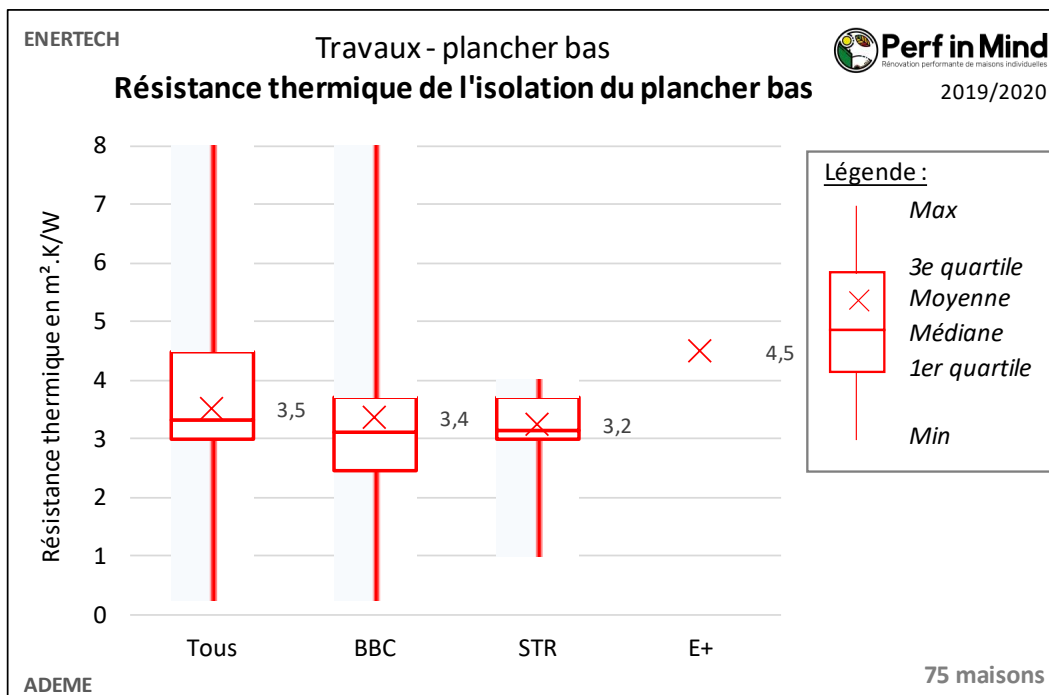


Figure 63 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la résistance thermique de l'isolant du plancher bas, selon le mode de définition de la performance visée.

Les statistiques pour les rénovations BBC sont alors comparables à celles de l'Observatoire BBC Effinergie pour les maisons individuelles rénovées :

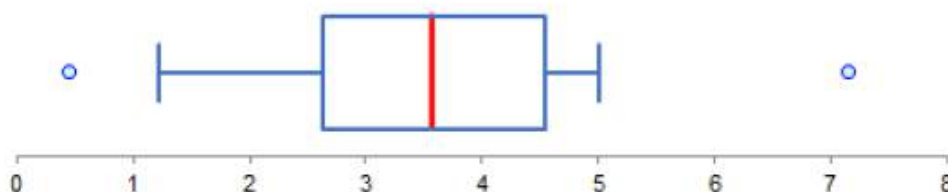


Figure 64 : Déciles, Quartiles, Médiane de la résistance des plancher bas en maisons individuelles après travaux.

Source : « Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles » d'Avril 2021.

La moyenne de résistance thermique de l'isolant des murs est proche à $R=3,4$ ici contre $R=3,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, ainsi que le premier quartile ($R=2,5$ ici contre $R=2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) et le troisième quartile ($R=3,7$ ici contre $R=4,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$). **L'échantillon de maisons rénovées BBC semble donc assez représentatif de la généralité des maisons rénovées BBC, en ce qui concerne le plancher bas.**

En comparaison, on note une isolation un peu plus faible, et une moindre dispersion, pour les rénovations définies avec les STR ($R=3,2$ en moyenne), tandis que les rénovations à énergie positives ont été conçues avec un $R=4,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

On peut également s'interroger de l'impact de la rigueur du climat sur le niveau d'isolation. Pour cela, comme pour les murs, nous avons distingué l'objectif de Cep des maisons rénovées BBC. Cet indicateur reflète en effet la rigueur de la zone climatique et l'effet de l'altitude :

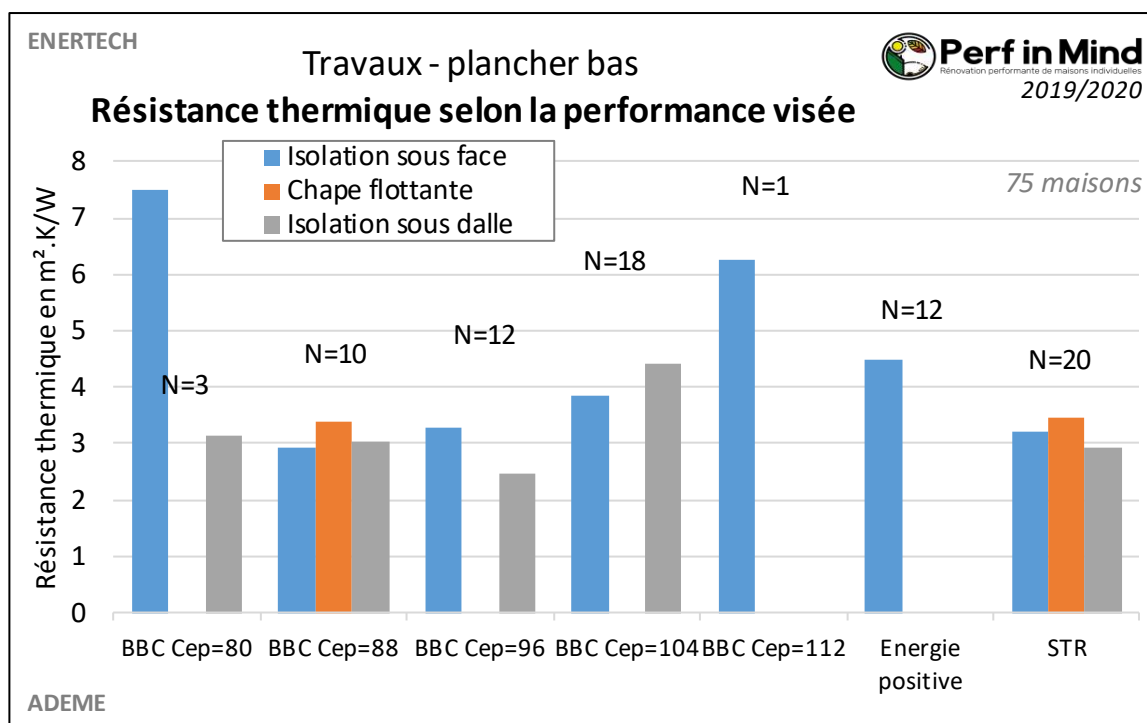


Figure 65 : Graphique de la résistance thermique moyenne de l'isolant principal du plancher bas, selon la performance visée, et en distinguant les techniques d'isolation.

Pour les opérations BBC, on semble constater comme pour les murs une corrélation de la résistance thermique des plancher bas avec la rigueur du climat (si l'on exclut la valeur $R=7,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ pour l'isolation

en sous-face en performance BC Cep=80, qui correspond à une seule maison). En effet, plus le Cep visé est élevé, c'est-à-dire **plus le climat est froid, plus les résistances thermiques mises en œuvre sont importantes, surtout en isolation en sous face**. La tendance est moins claire en isolation sous dalle, et il n'y a pas assez d'opérations en isolation sous chape.

2.4 Les menuiseries

2.4.1 Taux de renouvellement des menuiseries

La première question que l'on se pose concernant les menuiseries concerne la possibilité de les conserver si elles sont récentes, et assez performantes et étanches à l'air.

Le graphique suivant présente les statistiques sur les menuiseries remplacées ou non, exprimées en surfaces de menuiseries du volume chauffé (à l'exclusion des menuiseries des locaux non chauffés comme le garage ou le sous-sol, que l'on peut remplacer notamment pour des raisons esthétiques).

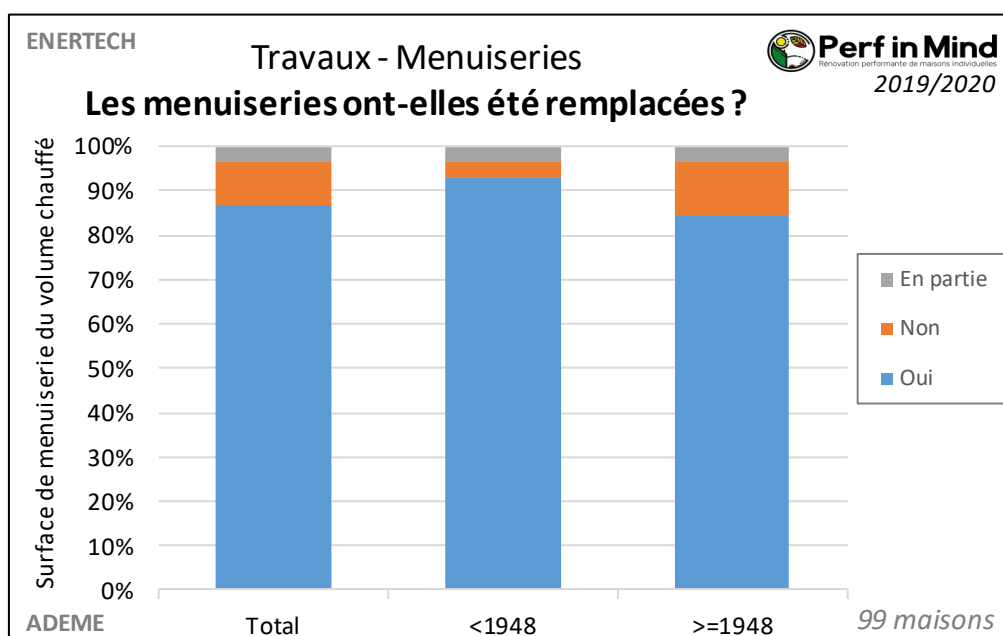


Figure 66 : Statistiques sur le remplacement des menuiseries lors de la rénovation, au global et par période de construction.

On observe que 87% des menuiseries ont été remplacées à l'occasion de la rénovation, ce qui concerne 89 maisons sur les 99 où nous avons pu recueillir ces informations. Cette proportion est légèrement supérieure pour les maisons d'avant 1948.

Cette proportion est supérieure à celle constatée dans l'Observatoire BBC Effinergie (79% de menuiseries remplacées).

2.4.2 Matériaux et vitrages

Nous nous concentrerons ici sur les menuiseries remplacées. Les matériaux utilisés sont les suivants :

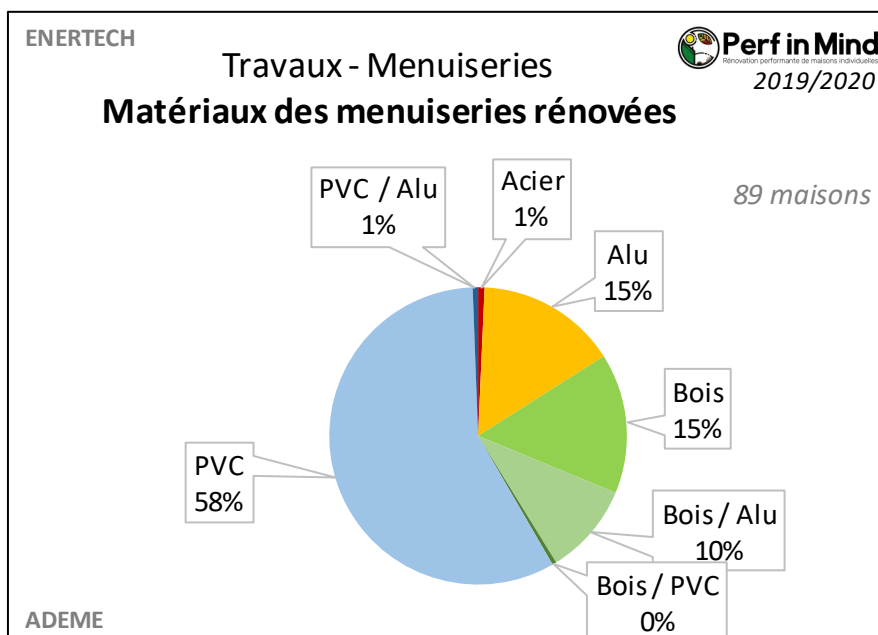


Figure 67 : Matériaux des menuiseries remplacées lors de la rénovation.

La majorité des menuiseries sont en PVC (58%). 15% des menuiseries sont en bois, 10% en bois-alu, et 15% en aluminium.

Ces tendances sont comparables à celles de l'Observatoire BBC Effinergie (55% de PVC, 26% de bois, 5% de bois-alu et 14% d'aluminium).

En ce qui concerne les vitrages des menuiseries rénovées, le graphique suivant présente la répartition entre double et triple vitrage :

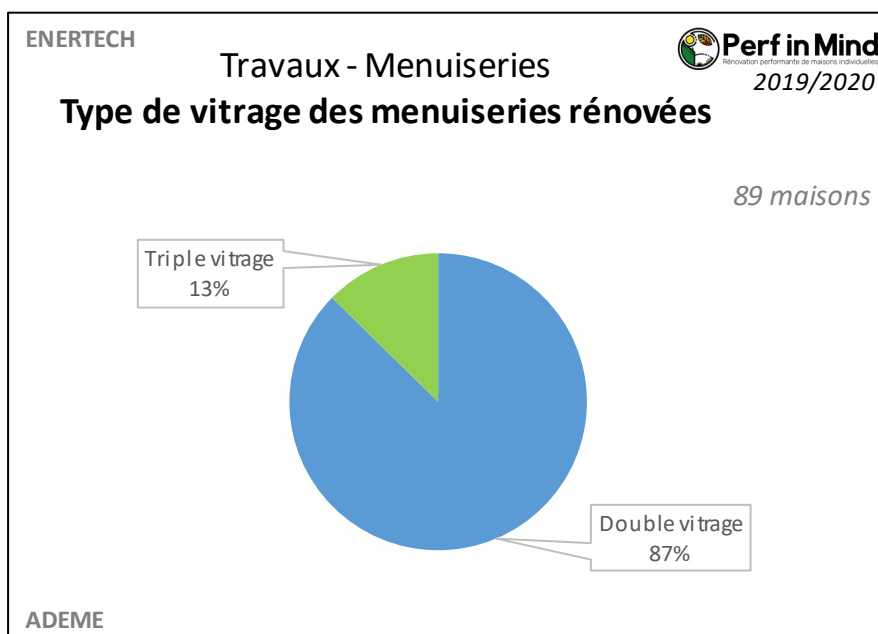


Figure 68 : Type de vitrage des menuiseries remplacées lors de la rénovation.

Les menuiseries remplacées sont en double vitrage dans 87% des cas et en triple vitrage dans 13% des cas, ce qui est moins que les 23% constatés dans l'Observatoire BBC Effinergie.

Si l'on rentre dans le détail technique des menuiseries, on peut observer des écarts importants entre les menuiseries conservées et les menuiseries rénovées :

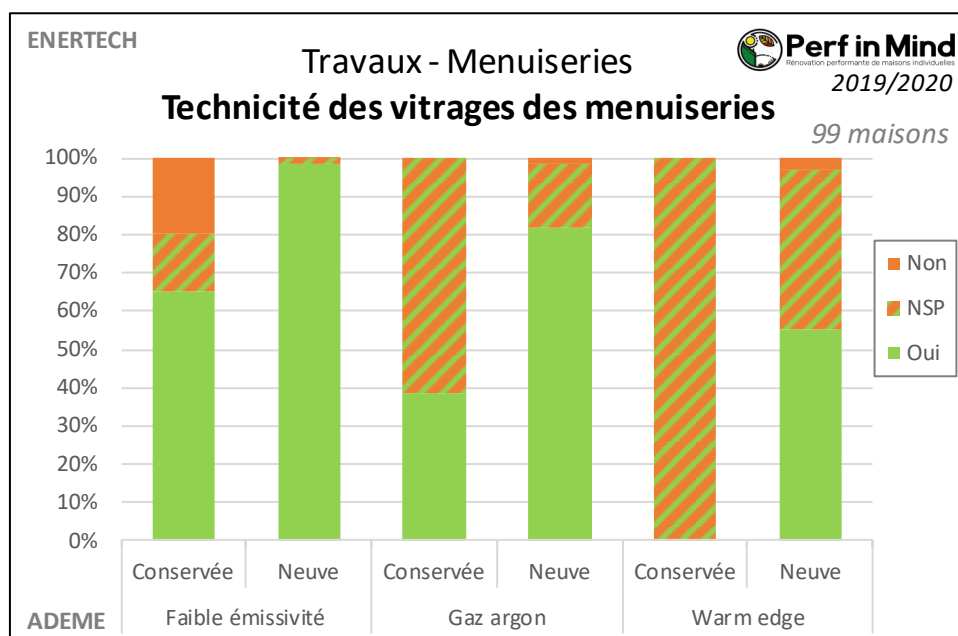


Figure 69 : Détails techniques des vitrages des menuiseries conservées et remplacées.

Si la quasi-totalité des menuiseries remplacées sont équipées de vitrage à faible émissivité et à gaz argon, en revanche ce n'est pas le cas ou en tout cas c'est moins certain des menuiseries conservées. Or ces paramètres expliquent l'extraordinaire amélioration des performances des vitrages d'aujourd'hui par rapport à des double-vitrages même de bonne épaisseur (4/16/4) d'il y a quelques années. Il est donc très important que les particuliers soient éclairés sur ces paramètres pour prendre le choix de rénover ou de conserver ses menuiseries récentes. Le fort taux de réponse « Ne sait pas » (NSP) semble laisser entendre que les ménages n'ont pas eu cette information ou ne s'en sont pas souvenus. Ceci nous rappelle que la performance thermique est aujourd'hui rarement le seul déclencheur de la décision de changer les menuiseries, qui est plus fréquemment motivée par l'esthétique ou les fuites d'air.

Les vitrages équipés d'intercalaires « warm edge » (dits aussi vitrages à bord chaud) permettent d'améliorer encore la performance globale de la menuiserie. Plus de 50% des menuiseries neuves en sont équipées.

2.4.3 Performance des menuiseries

La performance globale des menuiseries s'exprime par l'indicateur U_w (w pour « window » ou fenêtre, à ne pas confondre avec U_g avec un g pour « glass » qui caractérise le vitrage seul). U_w est une déperdition de chaleur, donc plus la valeur est faible plus la menuiserie est performante.

Nous intégrons ici dans l'analyse les fenêtres de toit qui n'étaient pas incluses dans les données des paragraphes précédents.

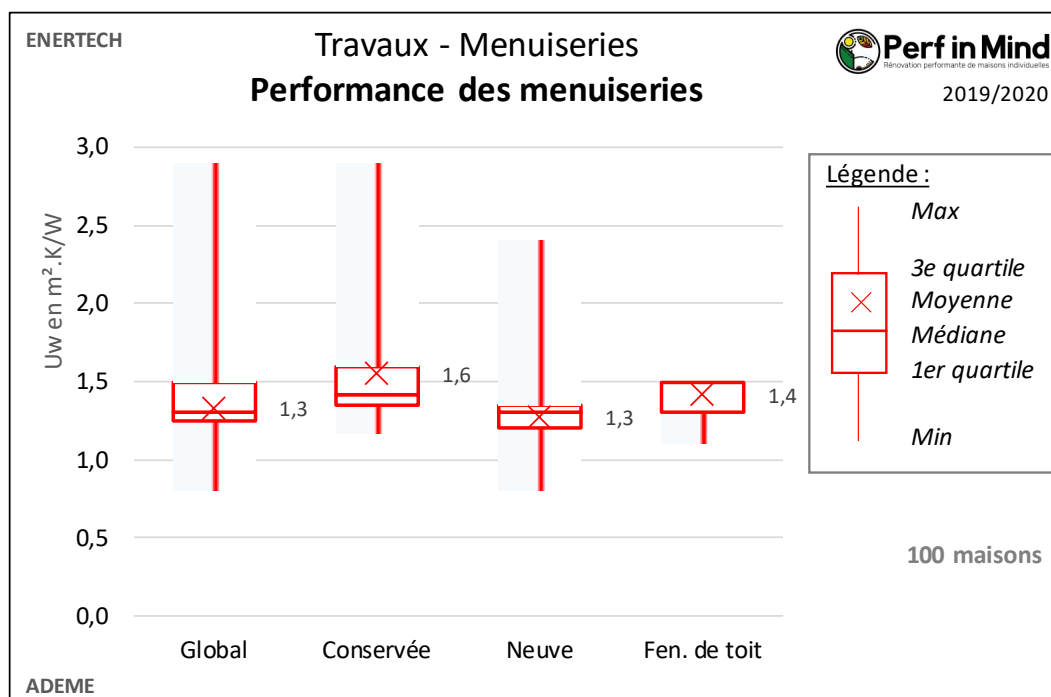


Figure 70 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la performance thermique U_w des menuiseries, au global et en différenciant les menuiseries conservées, neuves, et les fenêtres de toit.

La moyenne des U_w des menuiseries est de $U_w=1,3 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

Sans surprise vues les différences sur les caractéristiques techniques des vitrages (voir Figure 69), les menuiseries conservées sont moins performantes (U_w supérieur, dont la moyenne est de $U_w=1,6$).

Pour les menuiseries neuves (hors fenêtre de toit), le 3^e quartile est de $U_w=1,4$, ce qui signifie que 75% des menuiseries sont aussi ou plus performantes que cette valeur. Il est intéressant de noter que cette valeur est très inférieure au critère de $U_w=1,7$ demandé pour rendre **les travaux éligibles aux aides et financements** (crédit d'impôt, CEE, TVA réduite, prêt à taux zéro etc.). Il serait donc possible d'augmenter les exigences sur les performances des menuiseries dans ces critères, compte tenu de la maturité du marché des menuiseries performantes.

NB : il est difficile de comparer ces valeurs avec les statistiques de l'Observatoire BBC Effinergie, qui sont exprimées en U_{jn} (performance intégrant l'isolation apportée par les occultations selon un scénario de fermeture conventionnel).

Comme pour les autres parois, on peut se demander s'il y a une corrélation entre la performance des menuiseries et la rigueur du climat. Pour cela nous avons séparé les rénovations BBC par objectif de Cep, qui reflète à la fois la zone climatique et l'altitude :

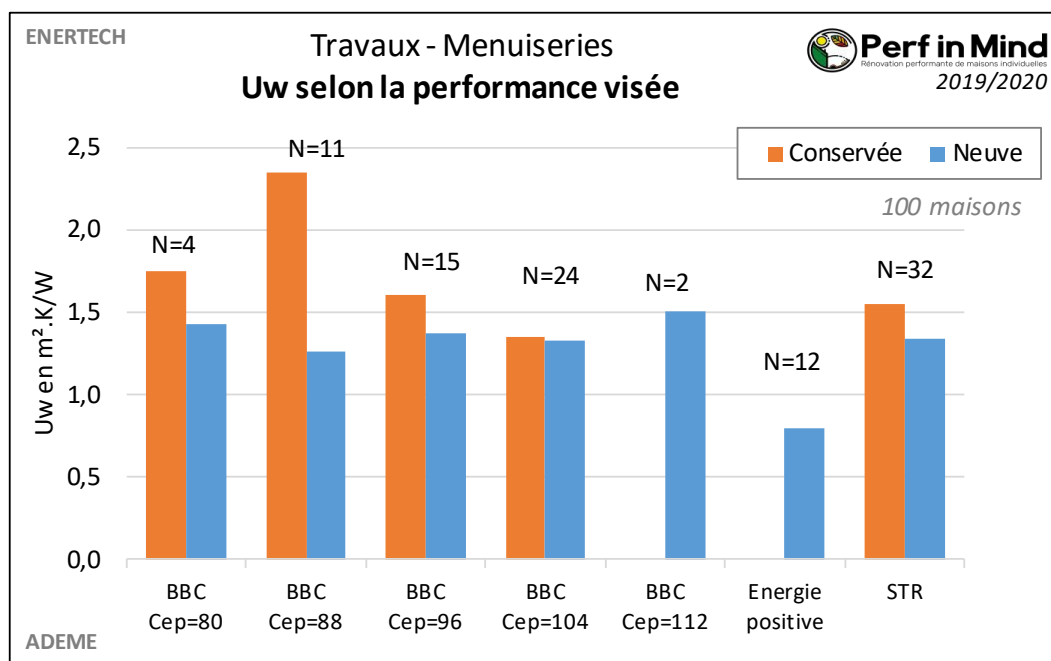


Figure 71 : Graphique de la performance thermique moyenne des menuiseries selon la performance visée, et en distinguant les menuiseries conservées et remplacées.

Au contraire des résistances thermiques des parois opaques, il ne semble pas se dessiner de corrélation entre la performance U_w et la rigueur du climat, sauf peut-être pour le choix de conserver des menuiseries existantes, où les U_w semblent plus élevés lorsque le Cep visé est faible, c'est-à-dire qu'on accepte de conserver des menuiseries moins performantes lorsque le climat n'est pas trop froid.

NB : nous n'avons pas pu collecter d'information sur le classement d'étanchéité à l'air des menuiseries (valeur A du classement AEV des menuiseries), même si cette information aurait été intéressante pour étudier l'étanchéité à l'air de l'enveloppe (voir §2.6).

2.4.4 Occultations

Les occultations des menuiseries sont importantes pour le confort, et en particulier pour se protéger du soleil la journée en été. Pour ce faire, seules les occultations extérieures sont vraiment efficaces.

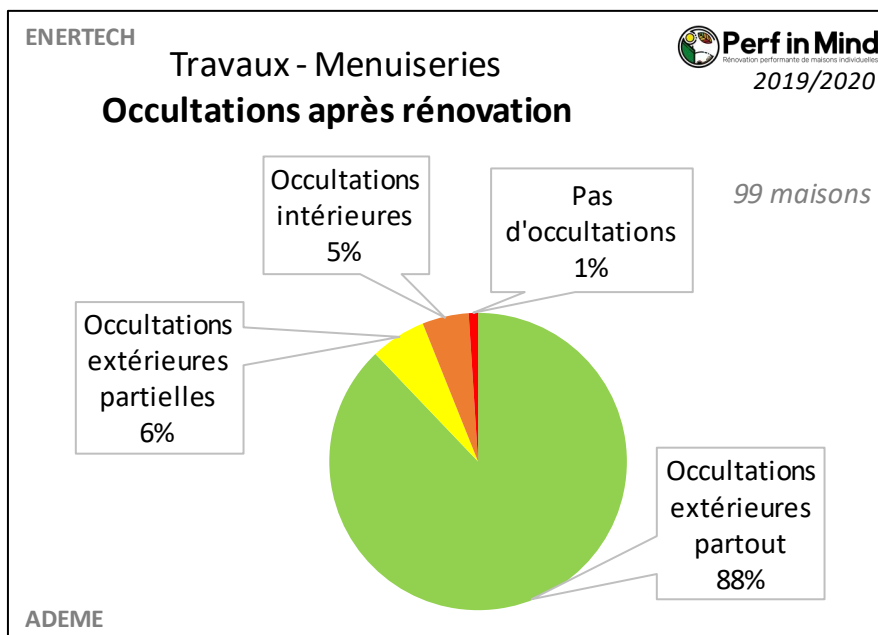


Figure 72 : Graphique des types d'occultations présentes après rénovation sur les menuiseries.

Des protections solaires extérieures sont présentes sur toutes les menuiseries dans 88% des cas. 6% des maisons en disposent sur une partie seulement des menuiseries, 5% ne disposent que d'occultations intérieures, et une seule maison ne dispose d'aucune occultation.

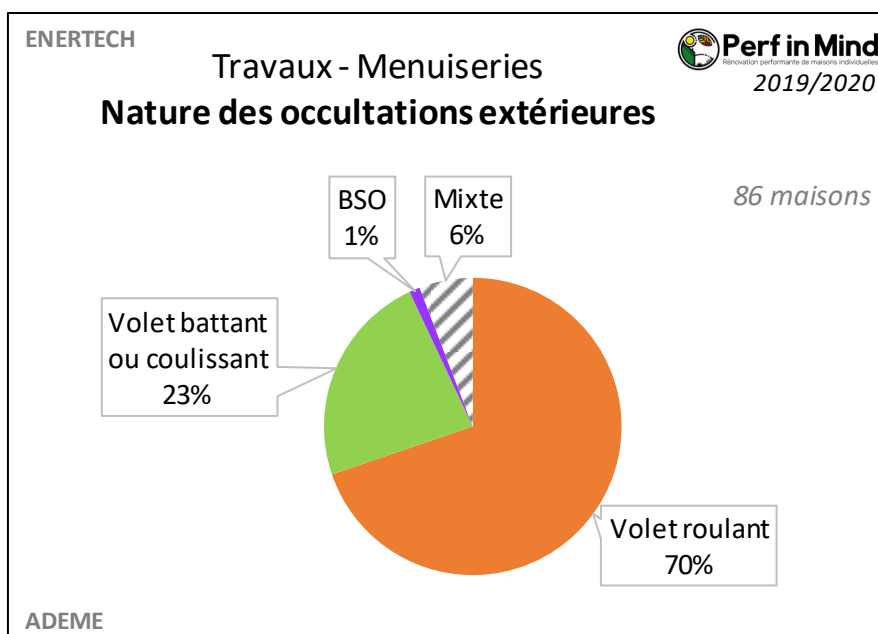


Figure 73 : Graphique de la nature des occultations extérieures après rénovation.

Sur les 86 maisons équipées d'occultations extérieures, les deux tiers (70%) sont équipés de volets roulants, 23% de volets battants ou coulissants, 1% de BSO. Pour 6% des maisons, ces types d'occultations ont été mélangés.

39 maisons sont équipées de fenêtres de toit. Leur protection peut être un enjeu particulièrement important pour le confort d'été des combles habités. En ce qui les concerne, **51% des fenêtres de toit sont équipées de volets extérieurs**, 31% d'un store intérieur et 5% n'ont pas d'occultation. L'information n'était pas disponible dans 13% des cas.

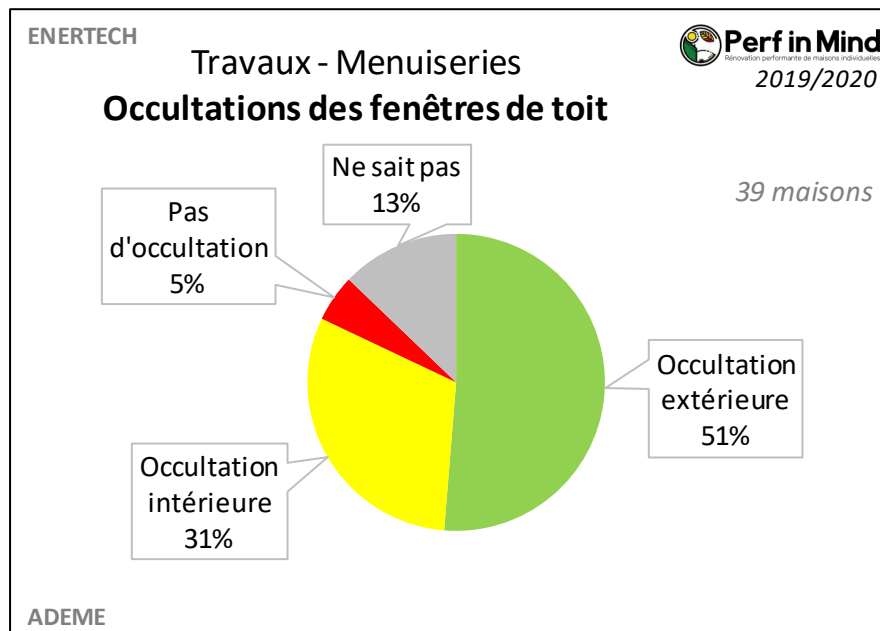


Figure 74 : Graphique des types d'occultations présentes après rénovation sur les fenêtres de toit.

L'absence d'occultation extérieure sur les menuiseries et les fenêtres de toit peut faire craindre des contre-performances en termes de confort d'été. Cependant, comme nous le verrons au §8.2, le confort est un enjeu qui recoupe de nombreux facteurs concernant le bâti (inertie, occultations, quantité de surfaces vitrées) mais aussi le comportement des habitants (usage des occultations, aération nocturne pour rafraichir etc.). Il est donc difficile d'observer des corrélations sur un aussi grand nombre de facteurs.

2.5 Les ponts thermiques

2.5.1 Estimation par le calcul

Méthodologie : le détail du traitement des ponts thermiques n'est pas connu sur l'ensemble des rénovations. Les modélisations réalisées pour les calculs BBC ne sont pas homogènes dans leur méthodologie, et on n'en dispose pas sur toutes les rénovations.

C'est pourquoi nous avons préféré utiliser la même méthodologie pour toutes les maisons. Nous avons ainsi **estimé les linéaires de ponts thermiques de façon automatique** à partir des métrés connus de la maison, de son nombre d'étage et d'un facteur de forme estimé. Les métrés les plus difficiles à estimer sont affectés d'un coefficient d'incertitude que l'on peut faire varier selon le mode de calcul (défaut, min, max), ce qui permet d'obtenir une fourchette d'incertitude autour de la valeur calculée. Par exemple les linéaires de plancher bas et plancher intermédiaire font l'objet d'une incertitude de $\pm 20\%$. Les métrés de terrasse et de balcons varient de 0 à 5 ml, tandis que le nombre d'angle rentrant varie de 0 à 2. De plus, les incertitudes sur des métrés mal connus de la maison vont se répercuter sur les ponts thermiques.

A ces métrés sont affectés des **déperditions linéaires** établies d'une part pour les murs isolés par l'intérieur et d'autre part pour les murs isolés par l'extérieur. Ces valeurs sont principalement inspirées des catalogues de ponts thermiques pour les murs en parpaing, qui sont majoritaires dans l'échantillon (voir Figure 7 page 18). Ces valeurs sont assez adaptées également pour les murs en brique et en pierre. Elles sont optimistes pour les murs en béton (12% des maisons).

Liaison :	Psi ITI (W/m.K)	Psi ITE (W/m.K)	Commentaire
Plancher bas - mur	0,51	0,38	Pondéré du b du plancher bas.
Plancher bas - terrasse	0,51	0,53	Pondéré du b du plancher bas.
Angle rentrant de murs	0,02	0	
Refend - mur / Angle mitoyen	0,34	0,06	
Refend - plancher bas	0,43	0,43	Pondéré du b du plancher bas.
Plancher intermédiaire - mur	0,6	0,07	Supposé dalle en béton.
Plancher intermédiaire - balcon	0,8	0,8	Supposé balcons en béton.
Menuiseries - mur	0	0	Valeur supposant des retours d'isolant jusqu' à la menuiserie.
Mur extérieur - toiture	0,04	0,05	En ITE, valeur supposant que la tête de mur est recouverte d'isolant.
Mur extérieur - pignon	0,08	0,29	

Figure 75 : Tableau des hypothèses de valeur des ponts thermiques en ITE et en ITI.

Comme indiqué dans le tableau, les ponts thermiques du plancher bas sont atténués du facteur b moyen calculé pour les parois du plancher bas, permettant ainsi de prendre en compte l'effet du sol, du sous-sol tempéré, et/ou de l'isolation périphérique le cas échéant.

NB : compte tenu de la méthodologie d'évaluation et des hypothèses adoptées, **l'incertitude sur le calcul des ponts thermiques est estimée à -50% / +80% en moyenne**. Pour les maisons dont les métrés sont les plus incertains, l'écart en déperdition peut aller de la moitié à un facteur 2,5. Nous attirons l'attention sur l'importance de cette variabilité, lorsque comme ici les métrés sont évalués à partir de facteurs de formes et non par une mesure détaillée sur plan.

Les déperditions des ponts thermiques ainsi estimés sont présentés dans le graphique ci-dessous. L'unité utilisée est la déperdition en W pour un écart de température de 30°C (par exemple 19°C intérieur et -11°C extérieur), et rapporté à la surface habitable (SHAB) de la maison :

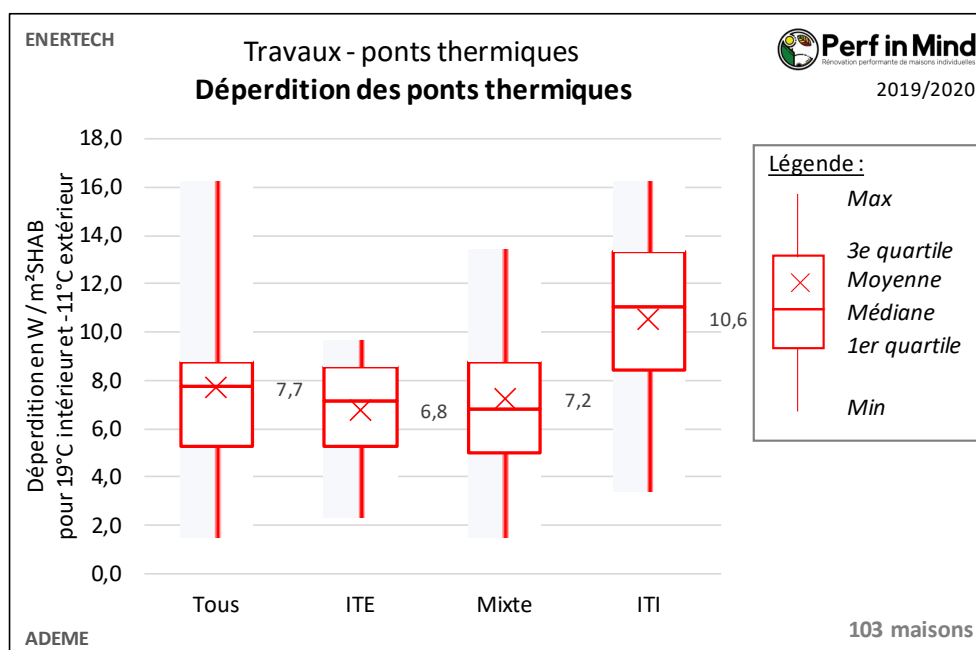


Figure 76 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de la déperdition des ponts thermiques, au global et en différenciant le mode d'isolation des murs.

La déperdition moyenne des ponts thermiques est de 7,7 W/m²SHAB, soit pour une SHAB moyenne de 124 m² (voir [§1.2.5](#)) un peu moins de **1 kW de déperditions** à la température de base de -11°C.

De façon logique on observe que les maisons **isolées par l'extérieur** ont en général des déperditions liées aux ponts thermiques plus faibles, notamment grâce au bon traitement des dalles intermédiaires, des refends, et de l'isolation périphérique des planchers bas le cas échéant (voir [§2.3.1](#)).

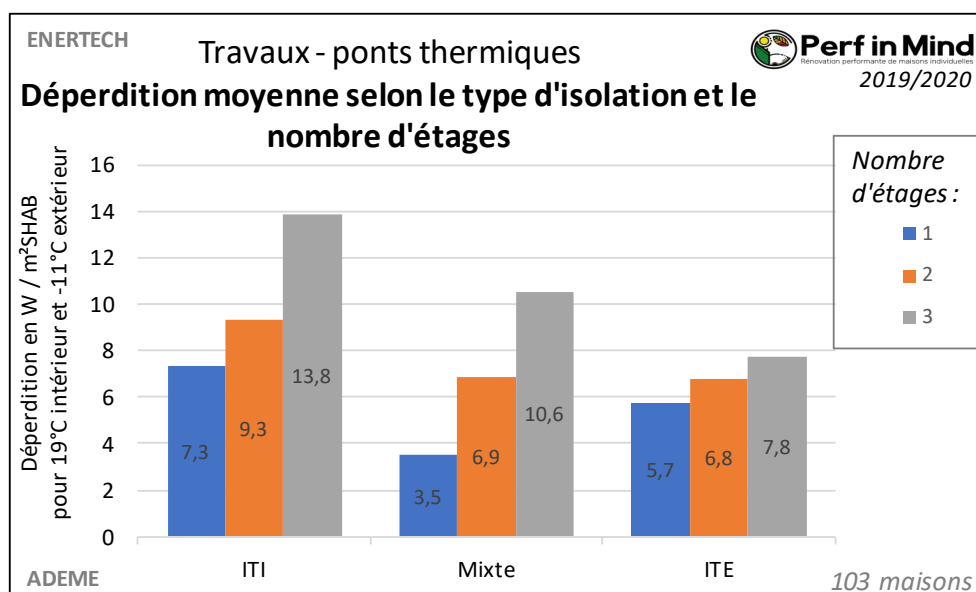


Figure 77 : Graphique des déperditions moyennes des ponts thermiques selon le mode d'isolation des murs et le nombre d'étages.

Le gain apporté par l'ITE sur les déperditions des ponts thermiques est même d'autant plus marqué qu'il y a un nombre d'étage important, ce qui est également logique puisque plus il y a d'étages, plus il y a de linéaire de planchers intermédiaires pour une surface habitable donnée.

2.5.2 Observations par caméra infrarouge

Lors de l'instrumentation des maisons en suivi avancé, nous avons procédé à une observation par caméra infrarouge. Celle-ci nous a permis d'identifier d'éventuels défaut d'isolation. Les thermogrammes permettent également d'illustrer les ponts thermiques typiques.

❖ Ponts thermiques classiques en ITI

En isolation par l'intérieur, les planchers intermédiaires en béton créent un pont thermique important, visible par exemple sur le thermogramme suivant (en orange, la paroi est chaude à l'extérieur donc la chaleur sort) :



Figure 78 : Thermogramme de mur isolé par l'intérieur, au niveau du plancher intermédiaire béton.

Dans le cas de plancher bois, lorsqu'il a été possible d'isoler entre les solives (comme sur la Figure 79 et Figure 80 ci-dessous, le plancher n'étant pas fermé en face inférieure), il n'y a pas de pont thermique au niveau du plancher.

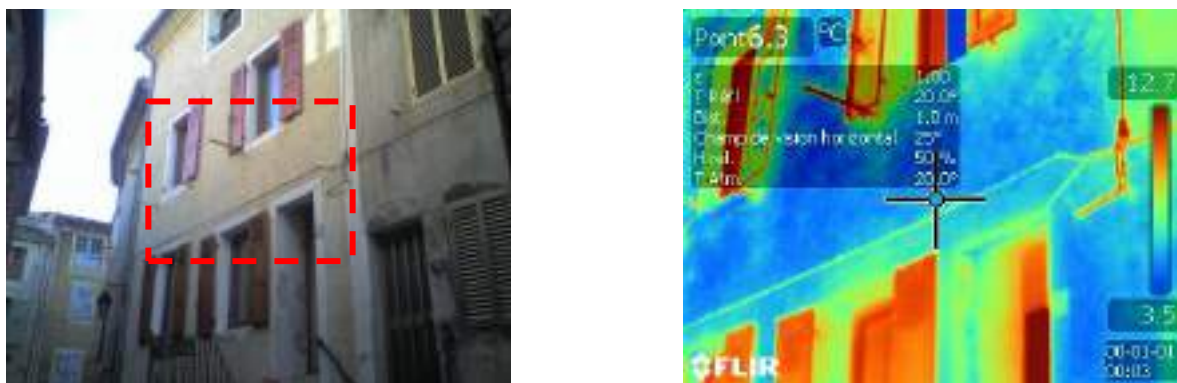


Figure 79 : Thermogramme extérieur de mur isolé par l'intérieur, au niveau du plancher intermédiaire bois.

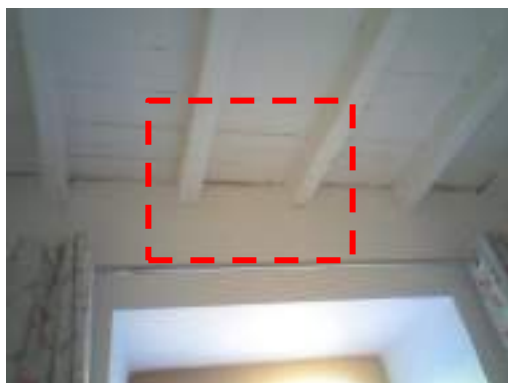


Figure 80 : Thermogramme intérieur de mur isolé par l'intérieur, au niveau du plancher intermédiaire bois.

Le cas général reste que l'ITI est interrompue au niveau du plancher bois (on n'ouvre pas le plancher pour isoler entre les solives), auquel cas il y a bien un pont thermique au niveau des planchers intermédiaires.

❖ Ponts thermiques classiques en ITE

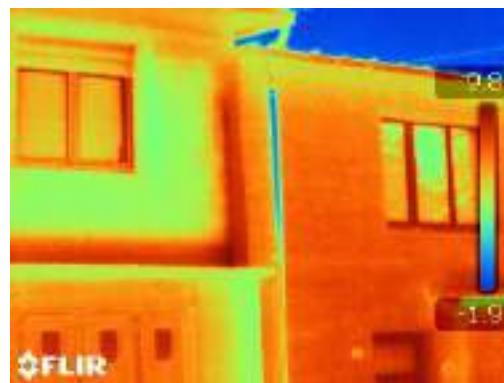


Figure 81 : Thermogramme de la façade d'une maison non isolée (à gauche) et de la maison suivie isolée par l'extérieur (à droite).

Sur le thermographe Figure 81 on observe pour la maison non isolée le pont thermique du plancher intermédiaire (en orange, la paroi est chaude à l'extérieur donc la chaleur sort). L'ITE est sous bardage, ce qui ne permet pas de comparer directement les déperditions avec la maison non isolée, mais le pont thermique du plancher intermédiaire n'est pas visible. A noter qu'il reste ici un pont thermique au niveau du refend mitoyen séparant les deux maisons.



Figure 82 : Thermogramme de la liaison du mur avec le sol en présence d'une ITE non enterrée.

En périphérie du plancher bas, ici la présence d'une dalle n'a pas permis d'enterrer l'ITE. Il reste donc un pont thermique périphérique.

Au contraire, sur le thermogramme Figure 83 on voit que l'ITE enterrée permet de rompre efficacement le pont thermique périphérique :

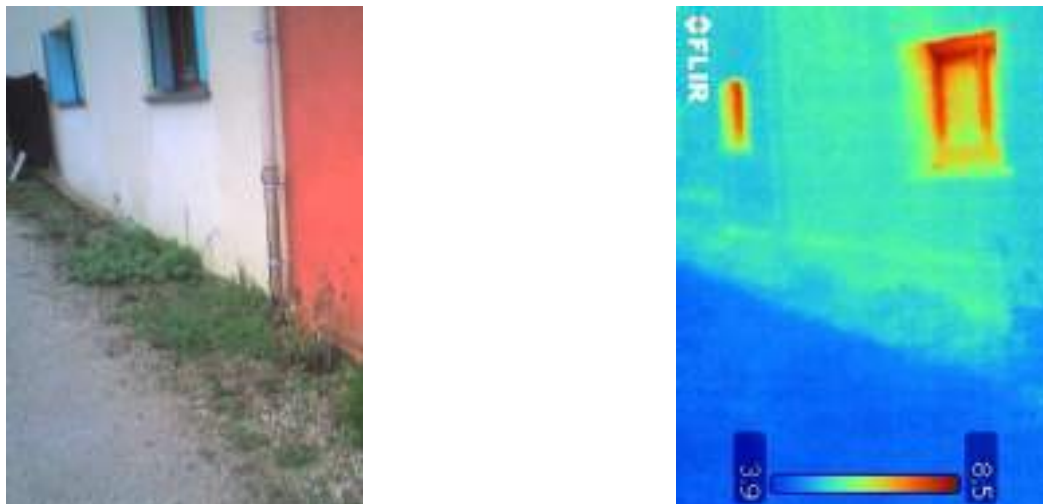


Figure 83 : Thermogramme de la liaison du mur avec le sol en présence d'une ITE enterrée.

A noter également l'absence de pont thermique en périphérie des menuiseries, grâce à un retour d'ITE jusqu'au dormant des menuiseries.

❖ Cas particuliers

La thermographie infrarouge a également permis d'attirer notre attention sur des cas particuliers ou des configurations atypiques.

Sur la maison présentée Figure 84 ci-dessous, la thermographie met en évidence des ponts thermiques important autour des menuiseries.



Figure 84 : Thermogramme de la liaison du mur avec les menuiseries en l'absence de retour d'ITE (rénovation par gestes).

L'analyse des documents montre qu'il s'agit d'une ITE réalisée précédemment. Les menuiseries ont été remplacées lors des travaux, mais il n'y a pas eu de retour d'isolation en tableaux, linteaux et appuis car il aurait fallu pour cela reprendre l'ITE et son enduit. Dans ce cas de **rénovation par « gestes »**, l'absence de retour d'isolant sur un linéaire aussi important **fait doubler la déperdition des ponts thermiques**, ce qui ajoute **environ 10%** au déperditions statiques de la maison (hors infiltrations et renouvellement d'air).

Autre observation qui a attiré notre attention : dans la maison présentée Figure 85, les ossatures portant les plaques de plâtre sont très visibles à la caméra thermique :

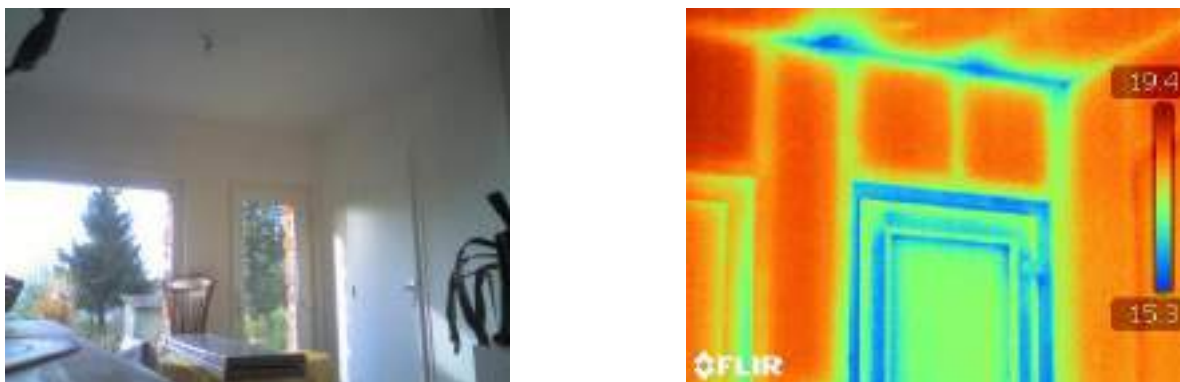


Figure 85 : Thermogramme des ponts thermiques d'ossature métallique traversant l'isolation intérieure.

Il s'agit probablement d'ossatures métalliques traversant l'isolant, ou présentant des appuis métalliques traversant l'isolant, et qui créent des ponts thermiques dits « intégrés », qui réduisent l'efficacité de l'isolant. Selon les règles de calculs de ces **ponts thermiques intégrés**, on peut estimer qu'ils **dégradent la performance de l'isolant de 30% environ**.

2.6 Etanchéité à l'air de l'enveloppe

L'étanchéité à l'air, ou niveau d'infiltrométrie, qualifie la quantité de fuites d'air qui peut rentrer et sortir d'un bâtiment sous une certaine pression. On la mesure par un test d'infiltrométrie. Deux unités sont utilisées :

- Le **Q4** est une unité utilisée en France, qui s'exprime en m³/h de débit de fuite par m² de surface déperditive hors plancher bas, sous 4 Pascal (soit la dépression d'une ventilation simple flux) ;
- Le **n50** est largement utilisé en Europe, et s'exprime en renouvellement d'air (volume par heure) sous 50 Pascal (soit la pression exercée par un vent de 30 km/h environ).

La conversion d'une unité à l'autre dépend de la compacité et de la hauteur sous plafond de la maison, ainsi que de l'exposant qualifiant l'écoulement d'air. En maison individuelle, on peut retenir qu'un Q4 de 0,8 m³/h par m² est équivalent à un n50 de 3 vol/h.

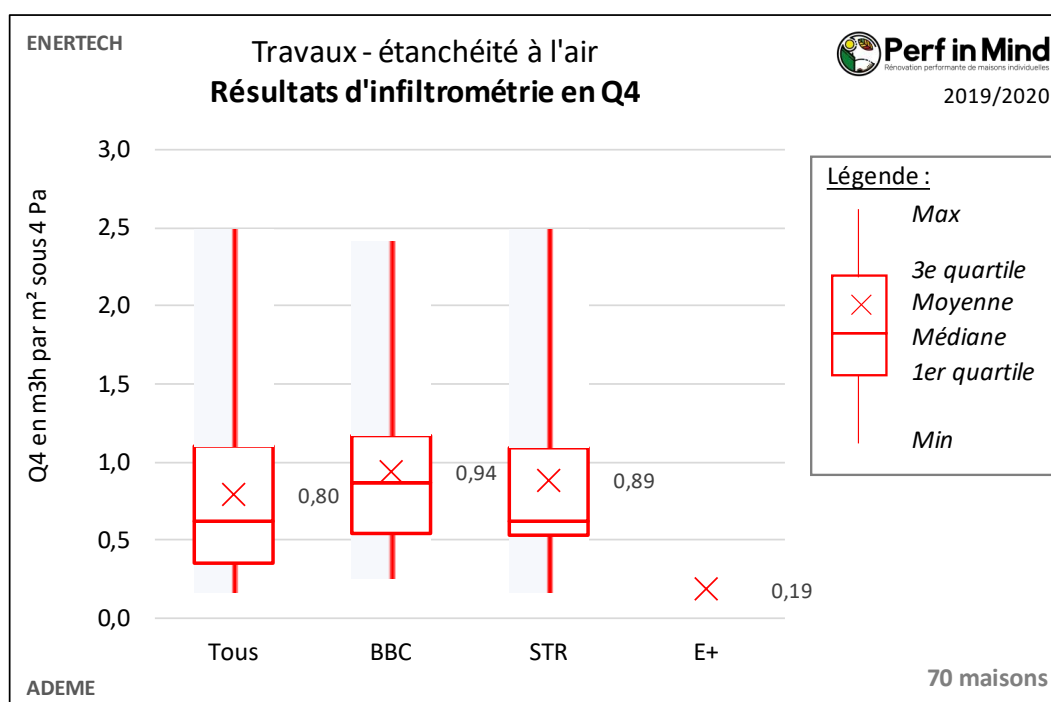


Figure 86 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) des résultats d'infiltrométrie exprimés en Q4, au global et en différenciant selon le mode de définition de la performance visée.

Pour les maisons BBC, on peut comparer ces statistiques à celles de l'Observatoire BBC Effinergie. On note que la moyenne de Q4 (Q4=0,9) est ici supérieure à celle constatée sur l'Observatoire (Q4=0,69)



Figure 87 : Déciles, Quartiles, Médiane de la résistance des toitures en maisons individuelles après travaux.
Source : « Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles » d'Avril 2021.

Méthodologie : pour le graphique suivant en n50, lorsque nous avons le Q4 mais pas le rapport de test mentionnant le n50, nous avons réalisé la conversion à partir des mètres de la maison et un exposant d'écoulement d'air classique de 0,6.

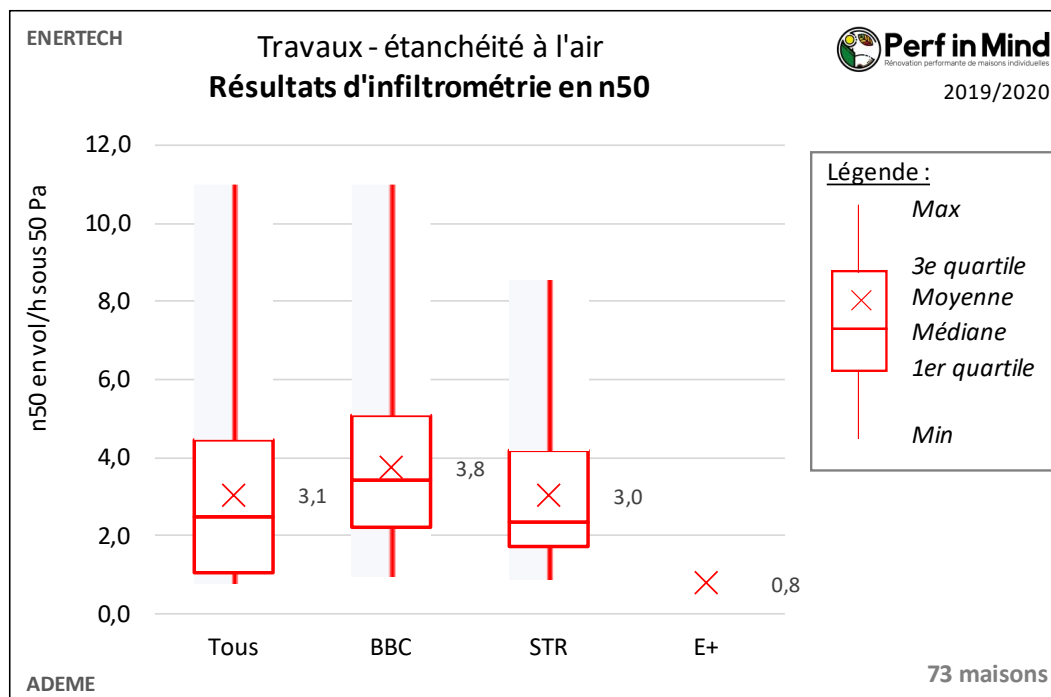


Figure 88 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) des résultats d'infiltrométrie exprimés en n50, au global et en différenciant selon le mode de définition de la performance visée.

La moyenne de l'étanchéité à l'air atteinte est de **Q4=0,8 m3/h par m²** ou **n50 = 3,1 vol/h**.

Les maisons ayant visé un objectif BBC rénovation sont globalement moins étanches à l'air que celles qui ont suivi une STR. Les 12 maisons à énergie positives ont une excellente étanchéité à l'air avec un Q4 de 0,19 m3/h par m² soit un n50 de 0,8 vol/h.

Au-delà des valeurs absolues, il est intéressant de comparer les résultats de test d'infiltrométrie à l'objectif qui avait été fixé lors de la conception.

Pour les maisons ayant visé un objectif BBC, il n'y a généralement pas d'objectif de Q4 défini. A titre de comparaison, on peut retenir la valeur Q4 de référence qui est de 1,7 m3/h par m².

Les maisons ayant visé un niveau Energie positive (E+) se sont données pour objectif un Q4 de 0,6 m3/h par m².

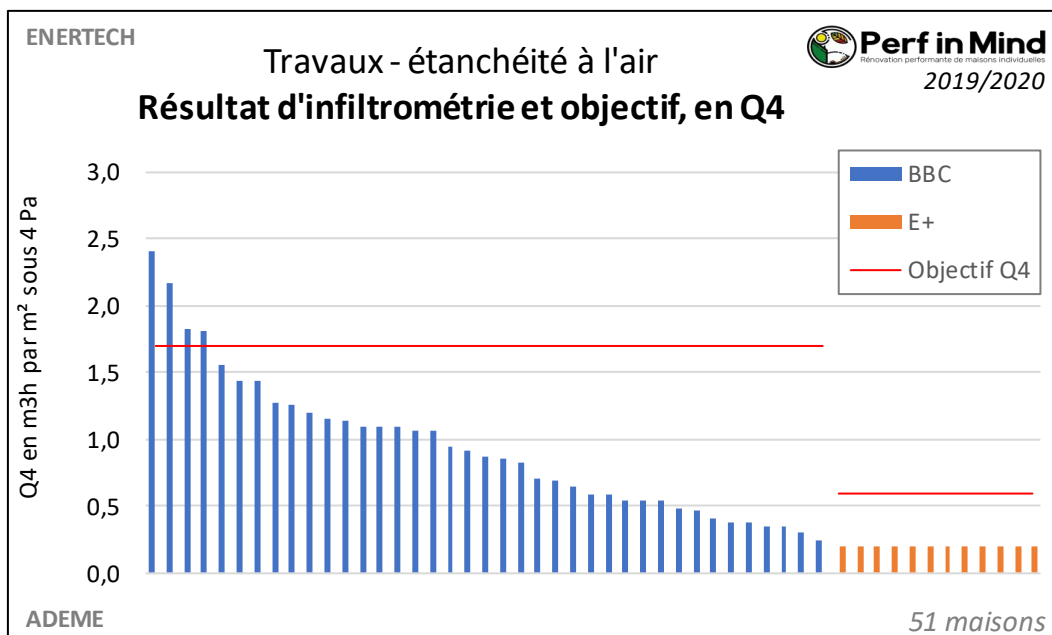


Figure 89 : Graphique des résultats d'infiltrométrie exprimés en Q4, en comparaison à l'objectif visé, pour les maisons dont la performance est définie par l'objectif BBC rénovation (BBC) et celles visant un niveau Energie positive (E+).

On note que seules 4 maisons sur 39 n'ont pas atteint la valeur de référence Q4=1,7 m3/h par m². Les 12 maisons à énergie positive ont largement atteint leur objectif.

Pour les maisons ayant défini leur objectif de performance sur les STR, il existe 2 valeurs cible selon le bouquet de travaux de choisi : le premier est fixé à n50 = 1 vol/h, le second à n50 = 3 vol/h.

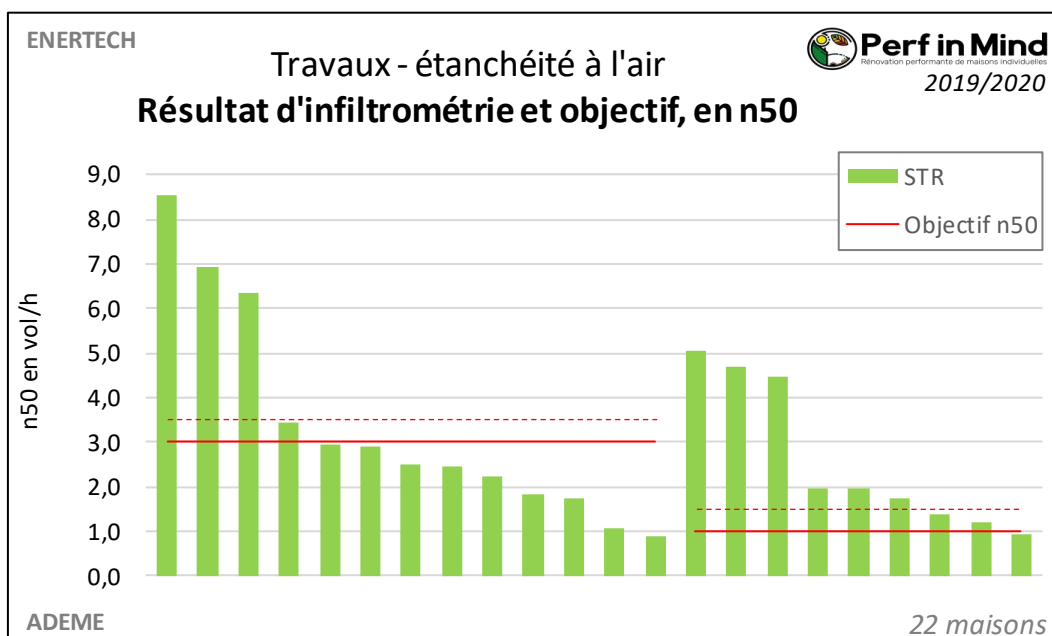


Figure 90 : Graphique des résultats d'infiltrométrie exprimés en n50, en comparaison à l'objectif visé, pour les maisons dont la performance est définie par les STR.

Pour les 13 maisons ayant visé une STR à n50=3 vol/h, 4 n'ont pas atteint l'objectif. Cette valeur passe à 3 si l'on prend en compte la marge de tolérance à n50 =3,5 vol/h (pointillé rouge).

Pour les 9 maisons ayant visé l'objectif très ambitieux de $n_{50}=1$ vol/h, seule une maison l'a atteint, les 8 autres l'ont dépassé. Si l'on prend en compte la marge de tolérance à $n_{50}=1,5$ vol/h, 3 maisons ont atteint l'objectif et 6 l'ont dépassé. Ceci ne constitue pas une contre-performance, mais illustre plutôt la très grande difficulté à atteindre une telle performance en rénovation. Le choix des STR visant un n_{50} de 1 vol/h semble donc à faire avec prudence.

2.7 Appréciation de la performance globale de l'enveloppe

2.7.1 Qualification de l'enveloppe par le Ubat

Afin de conclure cette partie consacrée aux travaux d'amélioration de l'enveloppe des maisons rénovées, nous pouvons dresser un bilan de la performance globale de l'enveloppe après travaux.

Pour cela, on peut utiliser plusieurs indicateurs. Dans le calcul RT2005-rénovation utilisé pour définir le niveau de performance BBC-réno, l'indicateur utilisé est le Ubat. Il reflète la déperdition moyenne de l'ensemble des parois, autrement dit le **niveau d'isolation moyen**. Cet indicateur comprend les parois opaques, les menuiseries, mais aussi les ponts thermiques. Il ne prend pas en compte les infiltrations d'air ni les déperditions liées à la ventilation. Ces déperditions sont rapportées à la somme des surfaces déperditives. On note que cet indicateur ne prend donc pas en compte la compacité des maisons, mais reflète la qualité de l'isolation apportée, hors étanchéité à l'air.

Méthodologie : Rebouclage entre Ubat et ATbat des rapports de calcul et la modélisation :

Les données recueillies et la modélisation des ponts thermique permet de recalculer les indicateurs Ubat et ATbat (surface déperditive hors plancher bas, utilisée notamment dans les tests d'infiltrométrie pour calculer le Q4). Le graphique suivant présente les statistiques des écarts entre le calcul réalisé à partir de la modélisation et les valeurs collectées directement dans les études thermiques et les rapports d'infiltrométrie :

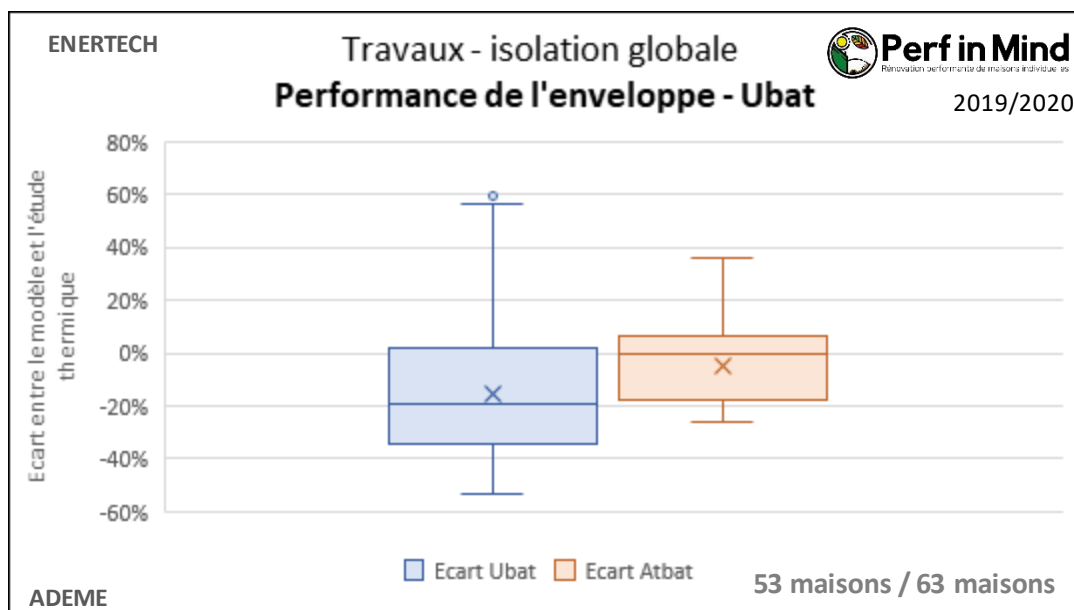


Figure 91 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de l'écart entre le Ubat et l'ATbat calculé à partir des données collectées, et les valeurs Ubat et ATbat des études thermiques et tests d'infiltrométrie.

Les écarts sont relativement assez limités, sauf ponctuellement sur certaines opérations où les données collectées sont peu fiables. Parmi les causes d'écart on peut citer :

- Des écarts entre les travaux prévus dans l'étude thermique et les travaux réellement réalisés,
- Des métrés recueillis sur facture ou devis, mais dont une partie correspond à des surfaces non déperditives (pignon sur comble non chauffé, ITE sur garage non chauffé etc.) et que nous n'avons pas pu identifier (pas de plan),
- La modélisation des ponts thermiques peut diverger du calcul thermique réalisé.

En moyenne, le Ubat calculé ici est plus faible que celui des études thermiques, ce qui signifie que **notre modélisation est plutôt optimiste en moyenne**. Dans la moitié des cas, l'écart en Ubat est compris entre -35% (1^{er} quartile) et +2% (3^e quartile).

De même la valeur ATbat calculée est en moyenne un peu plus faible que les données collectées, ce qui signifie également que notre modélisation est plutôt optimiste en moyenne. Dans la moitié des cas, l'écart en ATbat est compris entre -17% (1^{er} quartile) et +6% (3^e quartile).

L'analyse globale de la qualité de l'isolation qui suit sera basée sur la valeur Ubat issue des études thermiques lorsqu'elle est connue (valeur *a priori* plus fiable que notre modélisation, concerne 53 maisons) et sur la valeur calculée à partir de notre modélisation si l'étude thermique n'était pas disponible (concerne 50 maisons) :

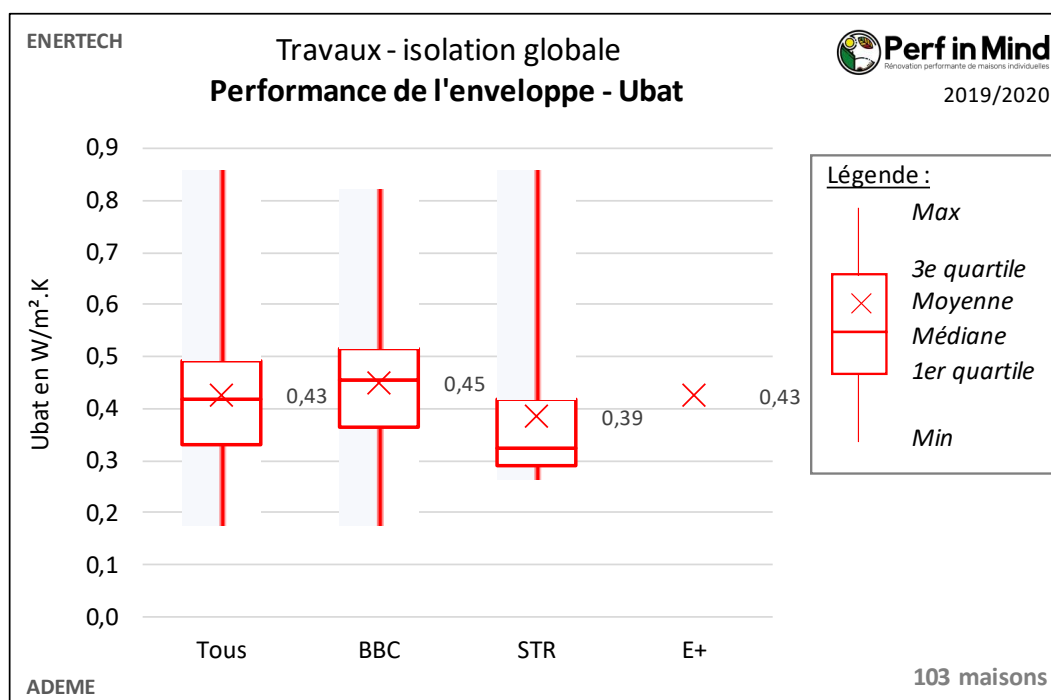


Figure 92 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) des valeurs Ubat de l'enveloppe après rénovation, au global et en différenciant selon le mode de définition de la performance visée.

La valeur moyenne de Ubat est de 0,43 W/m².K sur l'ensemble des 103 maisons suivies et modélisées.

Le Ubat moyen est un peu moins bon pour les maisons BBC, et un peu meilleur pour les maisons rénovées en utilisant les bouquets de travaux dits STR.

Les 12 maisons à énergie positive se situent dans la moyenne de l'ensemble des maisons, ce qui semble étrange vu la qualité de l'isolation réalisée, systématiquement supérieure à la moyenne des autres rénovations. Deux facteurs peuvent expliquer ceci : d'une part, il s'agit de maisons en bandes, donc la surface déperditive à laquelle est rapportée le Ubat est faible. Or le Ubat intègre les déperditions des ponts thermiques, qui restent présents sur cette opération notamment au niveau du plancher bas, et ces déperditions rapportées à une faible surface déperditives sont très impactantes en Ubat. D'autre part, ces données de Ubat sont issues de l'étude thermique et non de l'évaluation faite dans notre outil d'analyse des données. La source différente de bon nombre de projets peut introduire un biais. En l'occurrence sur cette opération que notre estimation du Ubat est optimiste de -35% par rapport à un calcul précis.

On peut comparer les données sur les rénovations BBC avec celles de l'Observatoire BBC Effinergie :

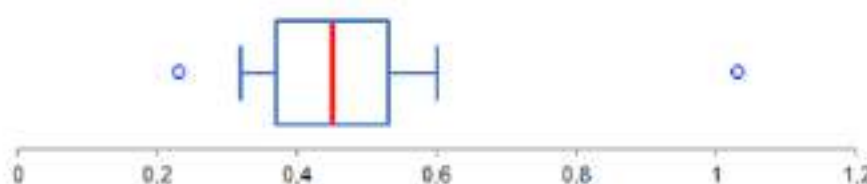


Figure 93 : Déciles, Quartiles, Médiane de la valeur Ubat après travaux.

Source : « Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles » d'Avril 2021.

Les statistiques sont très proches : moyenne identique à Ubat = 0,45, premier quartile identique à 0,37 et troisième quartile très proche (0,52 ici contre 0,53 dans l'Observatoire). **Le niveau d'isolation des rénovations BBC suivies dans ce projet semble donc parfaitement représentatif des pratiques générales en rénovation BBC de maisons individuelles.**

2.7.2 Qualification de l'enveloppe par la déperdition

Comme indiqué précédemment la valeur Ubat ne prend pas en compte les déperditions par les infiltrations d'air ni la ventilation. Pour compléter cette analyse, nous allons nous intéresser aux **déperditions globales** des maisons, c'est-à-dire la puissance thermique nécessaire pour maintenir les maisons à 19°C lorsqu'il fait -11°C dehors sans apports gratuits (qui seront pris en compte dans le calcul du besoin de chauffage, voir [§4.3](#)).

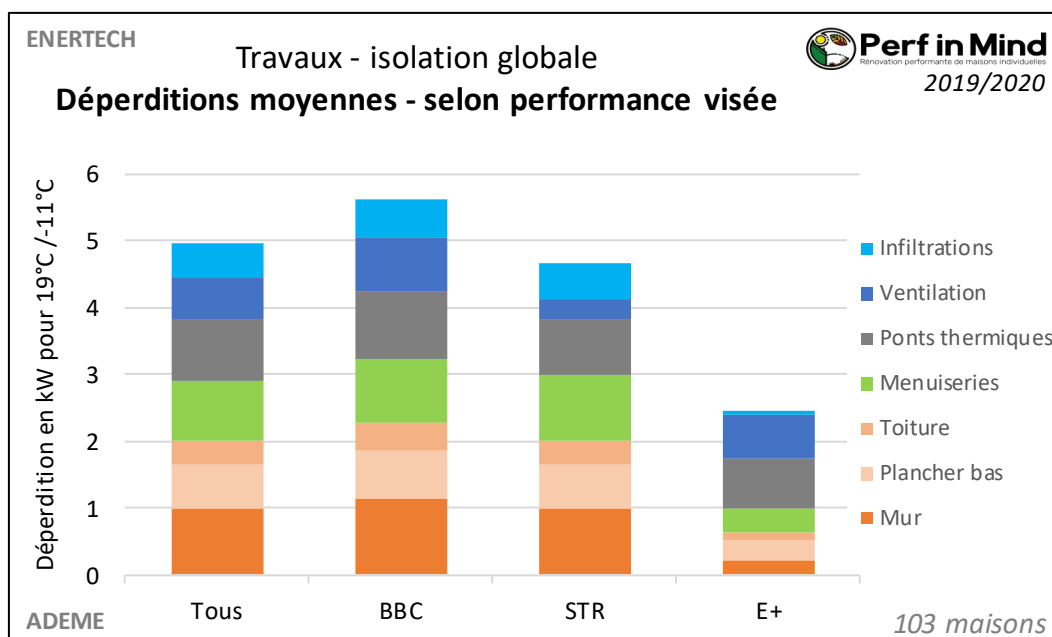


Figure 94 : Graphique des déperditions moyennes en kW, au global et en différenciant selon le mode de définition de la performance visée.

On observe que les déperditions moyennes de l'ensemble des maisons est **d'environ 5 kW**. Ce faible besoin de puissance caractérise les rénovations complètes basse consommation. Cette particularité doit être prise en compte dans le dimensionnement des systèmes de chauffage après rénovation.

En moyennes, les murs représentent 20% des déperditions, les ponts thermiques 18%, les menuiseries 18%, la ventilation 14%, le plancher bas 13%, les infiltrations 10% et la toiture 7%.

Si l'on distingue les déperditions par mode de définition de la performance, on note que les rénovations BBC sont un peu plus déperditives en moyenne, les rénovations basées sur les STR un peu moins déperditives. Les maisons à énergie positives sont deux fois moins déperditives, aidées en cela par le fait qu'il s'agit de maisons en bande, particulièrement compactes (alors que leur Ubat, donc les niveaux d'isolation, sont plutôt dans la moyenne des 103 maisons).

Nous avons également identifié les maisons ayant conservé des surfaces déperditives non isolées, soit des murs non isolés, soit un plancher bas principal non isolé ou isolé en périphérie :

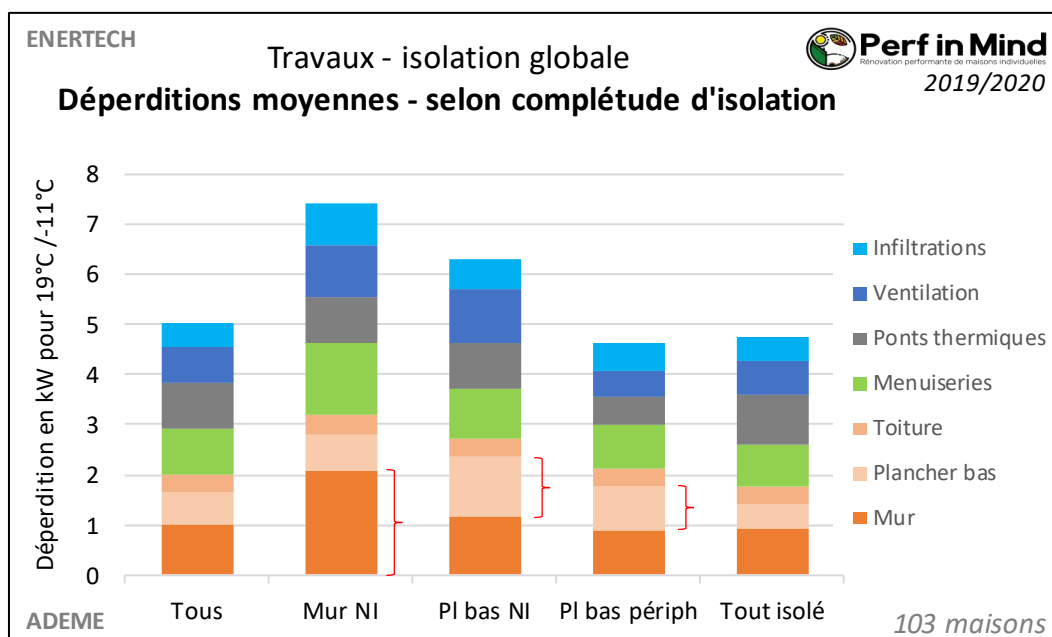


Figure 95 : Graphique des déperditions moyennes en kW, au global et en différenciant selon la complétude de l'isolation : dans l'ordre les maisons présentant un mur non isolé (NI), un plancher bas principal non isolé, un plancher bas isolé en périphérie, et enfin les maisons dont toute l'enveloppe a été isolée.

Les maisons présentant une partie de **murs non isolés** (4 maisons concernées) sont fortement impactées par une déperdition supplémentaire de plus de 1 kW sur le poste déperdition des murs, soit **+110% sur ce poste**.

Les maisons dont le **plancher bas principal n'a pas été isolé** (terre-plein, vide sanitaire non accessible, ou autre, concerne 15 maisons) ont en moyenne plus de 0,5 kW de déperditions supplémentaires, soit **+85% sur ce poste**. Les maisons ayant prévu une **isolation périphérique** de ce plancher bas non isolé (15 maisons) ont limité cette déperdition supplémentaire à 0,2 kW soit **+35% sur ce poste**.

L'impact des infiltrations peut également s'observer si on différencie les maisons dont le n50 après travaux est dans le premier quartile des résultats connus (de 0 à 1 vol/h), le deuxième (de 1 à 2,6 vol/h), le troisième (de 2,6 à 4,5 vol/h) ou le quatrième (supérieur à 4,5 vol/h).

Méthodologie : la déperdition liée aux infiltrations est modélisée comme un renouvellement d'air égal au n50 divisé par 20, selon le ratio établi par le CETE de Lyon.

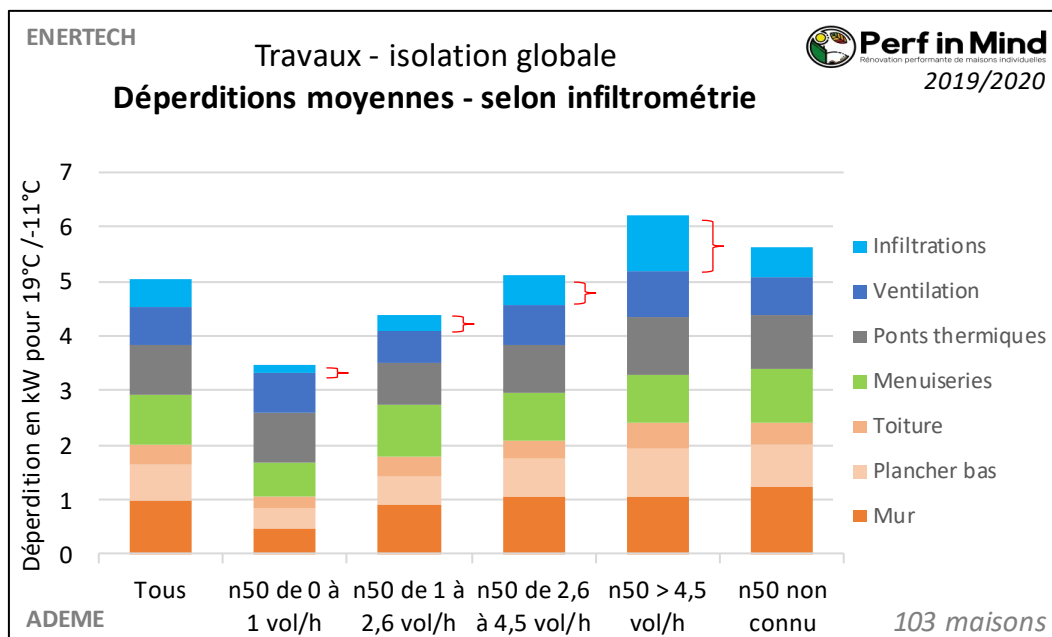


Figure 96 : Graphique des déperditions moyennes en kW, au global et en différenciant selon le niveau d'étanchéité à l'air.

On note que la contribution des infiltrations à la déperdition passe de 0,12 kW à plus de 1 kW du premier au quatrième quartile. Ceci est en soi un impact important, qui montre bien **l'importance de l'étanchéité à l'air dans la performance** des rénovations.

De façon étonnante, le graphique semble montrer une corrélation entre infiltrométrie et déperditions, comme si la qualité du traitement de l'étanchéité à l'air avait été corrélée à la performance de l'isolation réalisée, ce qui serait surprenant. L'explication réelle nous semble plutôt que les meilleurs n50 sont atteints dans les maisons très compactes, donc également peu déperditives, alors qu'au contraire dans une maison peu compacte il est plus difficile d'atteindre un bon n50 et qu'en même temps la maison est plus déperditive.

Si l'on anticipe la question de la ventilation (voir §3.1), on peut également mesurer l'impact du choix d'une ventilation simple flux autoréglable, simple flux hygroréglable ou double flux avec récupération de chaleur.

Méthodologie : la déperdition liée à la ventilation a été modélisée ici **sur la base du fonctionnement normal de chaque type de ventilation**. Ainsi nous avons fait l'hypothèse d'un renouvellement d'air de 0,5 vol/h en ventilation autoréglable et double flux (autoréglable également), et de 0,3 vol/h pour les ventilations hygroréglables. L'efficacité de récupération de chaleur est la moyenne des valeurs mesurées dans les suivis avancés, soit 82%.

Comme nous le verrons par la suite, en réalité les débits réels ont été différents des débits attendus dans de nombreuses maisons, en plus ou en moins. De même, l'efficacité de récupération de chaleur a été variable d'un projet à l'autre. Voir le §3.1.3 pour la description des ventilations mises en œuvre et §4.2.4 pour la mesure du fonctionnement réel et de son impact sur les consommations de chauffage. Les données mesurées seront réinjectées dans le calcul du besoin de chauffage au §4.3.

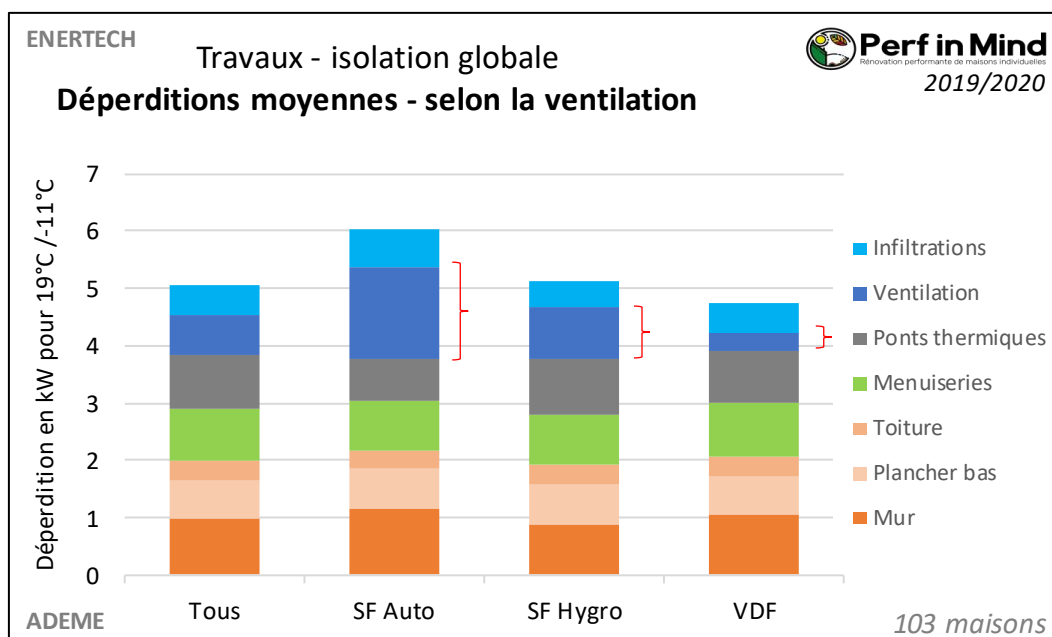


Figure 97 : Graphique des déperditions moyennes en kW, au global et en différenciant selon le type de ventilation.

On observe que la ventilation simple flux autoréglable (« SF Auto ») conduit en moyenne à une déperdition de 1,6 kW. La ventilation simple flux hygroréglable (« SF Hygro ») permet de réduire les débits, donc également les déperditions à 0,9 kW en moyenne. La récupération de chaleur de la ventilation double flux permet de réduire encore plus les déperditions, permettant d'atteindre 0,3 kW de déperditions en moyenne. Cette forte variation des déperditions montre bien **l'importance du choix de la ventilation dans la performance thermique de la rénovation**.

2.7.3 Identification des « contre-performances » sur l'enveloppe

❖ Observation de contre-performances sur l'enveloppe

Le croisement des données sur les rénovations réalisées, les relevés sur site, certaines données de mesure, permettent d'identifier un certain nombre de **maisons où des raisons objectives nous semblent de nature à expliquer une contre-performance sur le besoin de chauffage** :

- Les rénovations dont la **conception a été au final non conforme au référentiel visé**, ce qui concerne 10 maisons sur 62 visant le BBC et 3 maisons sur 32 appliquant une STR. Voir à ce sujet le §1.3.2. Nous les identifierons par le code « NC » (Non Conforme au référentiel visé) dans le graphique ci-dessous.

NB : L'une des maisons non conformes au BBC l'a été en raison de la production ECS, l'enveloppe était quant à elle performante, nous ne l'avons pas identifiée « NC » sur les graphiques dédiés à l'analyse du chauffage.

- Certaines rénovations comportaient une partie de **mur donnant sur l'extérieur non isolé** (les murs mitoyens ne sont pas concernés), ou un **plancher bas non isolé** (ni en surface ni en périphérie). Voir à ce sujet les §2.1, 2.3 et pour l'impact des parois non isolées sur la déperdition le §2.7. L'absence totale d'isolation de ces surfaces, parfois importantes, ne nous semblent pas conforme à la définition de rénovation performante au sens où selon nous la totalité de l'enveloppe doit être

- traitée (ne serait-ce que par une isolation périphérique dans le cas des planchers bas non isolables). Ces rénovations seront identifiées par le code « NI » (présence d'une paroi Non Isolée).
- Enfin, certaines rénovations présentent un **niveau d'infiltrations très élevé**. Nous avons placé le seuil au niveau du 3^e quartile des valeurs de n50 connues sur les maisons suivies, qui est de $n50=4,5$ vol/h (voir §2.6), c'est-à-dire que nous identifions ici par le code « I » (Infiltrations élevées) les 25% de maisons les moins étanches à l'air.

Il est important de souligner que nous n'avons identifié ici que les contre-performances dont nous nous sommes aperçus en analysant les documents à notre disposition. Il est tout à fait possible que d'autres contre-performances nous aient échappé, notamment en suivi « base » où nous n'avons pas visité les maisons. Ceci pourrait expliquer certaines consommations de chauffage très élevée.

L'identification des maisons présentant ces non-conformités est réalisée sur le graphique suivant, relatif aux déperditions des maisons rapportées à la surface habitable (en W/m^2_{SHAB}) :

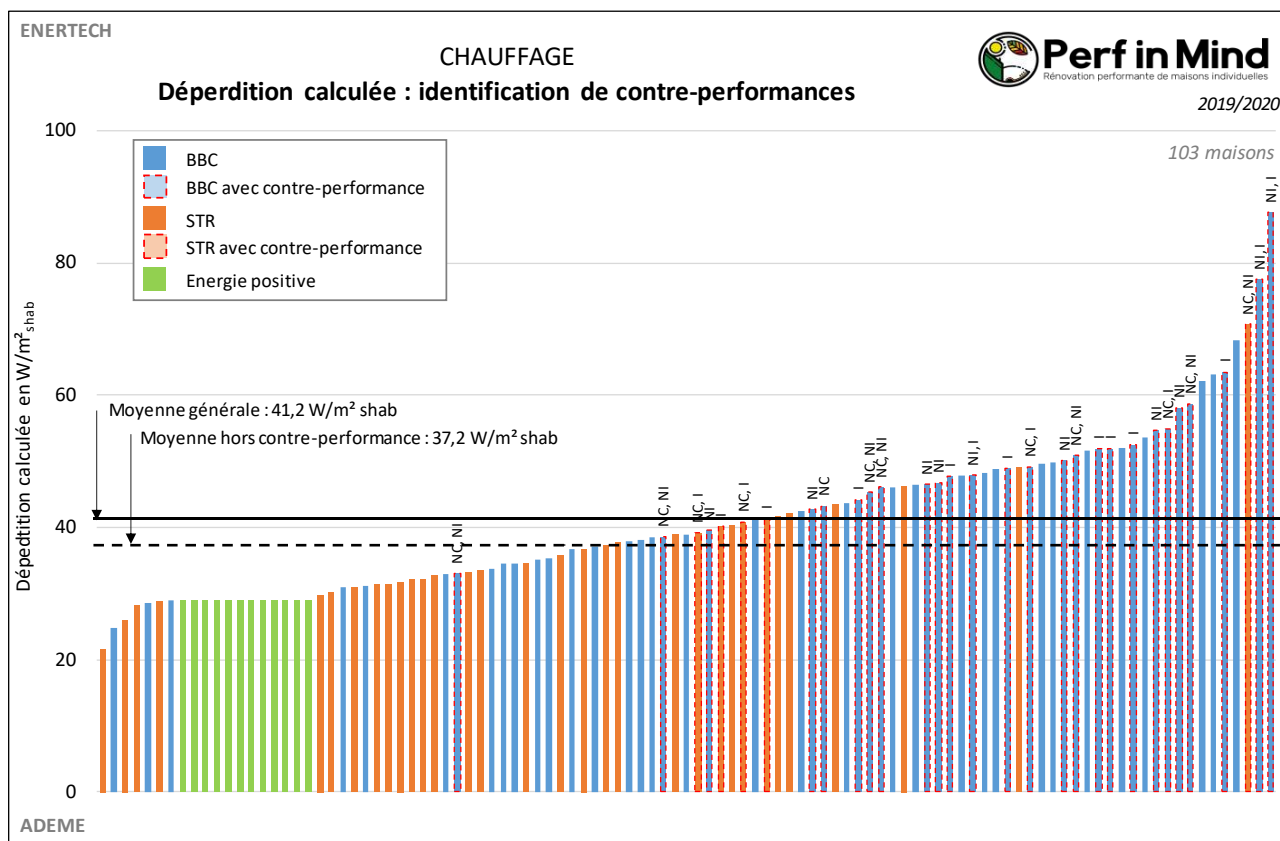


Figure 98 : Graphique des déperditions rapportées à la SHAB, par type de dispositif et en identifiant les « contre-références ». Le code au sommet du barreau est « NC » pour non conforme au référentiel, « NI » pour présentant une paroi non isolée (même pas en périphérie pour le plancher bas), et I pour un résultat d'infiltrométrie élevé ($n50 > 4,5$ vol/h).

On note que tous dispositifs confondus, la moyenne hors contre-performance est inférieure de 10% à la moyenne générale. De plus, sur les 20 ratios de déperdition les plus élevés, 13 concernent des maisons présentant de telles non-conformités.

Nous reprendrons cette classification notamment au §4.1.1 lorsque nous présenteront les besoins de chauffage issus de la mesure.

❖ Discussion sur les causes possibles des non-conformités aux référentiels

Nous nous concentrons ici sur les 13 maisons qui n'ont pas respecté leur référentiel de performance (BBC ou STR). Nous nous sommes interrogés sur 2 causes possibles qui pourraient justifier le choix de ne pas respecter ces objectifs de performance.

La première hypothèse a été l'année de construction des maisons. On sait que les maisons anciennes, d'avant 1948, sont parfois plus complexe en raison de la migration de vapeur qui y est plus sensible, et le cas échéant d'enjeux patrimoniaux. Nous avons extrait la période de construction des maisons concernées (étudiée au §1.2.1) sur le graphique suivant :

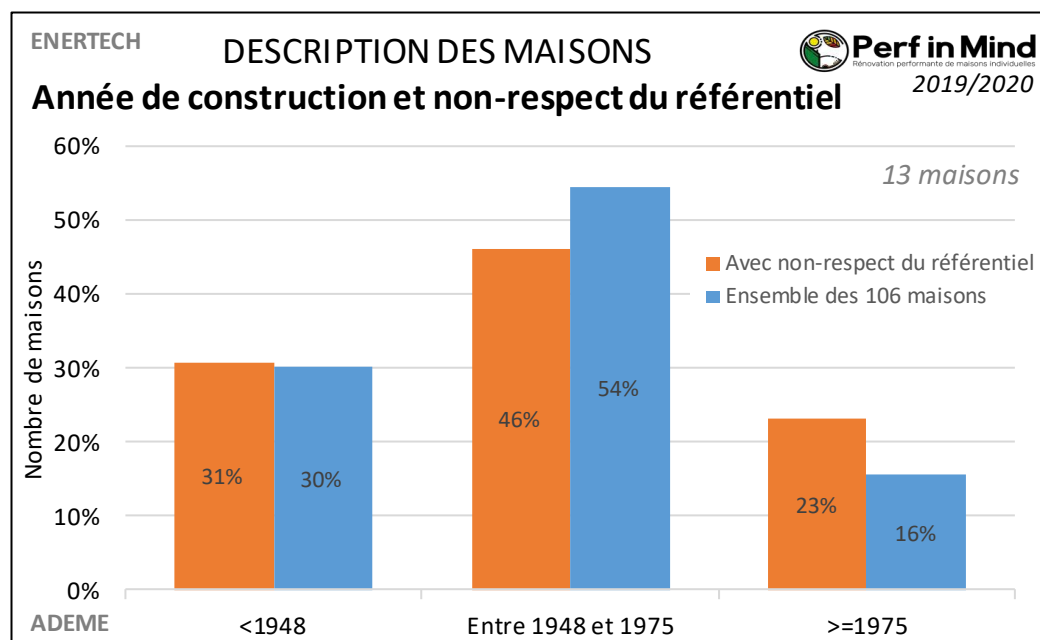


Figure 99 : Statistiques de l'année de construction de l'ensemble des 106 maisons (en bleu) et pour les 13 maisons n'ayant pas respecté leur référentiel (en orange).

On note qu'il n'y a pas de différence notable, et en particulier pas de sur-représentation des maisons d'avant 1948.

L'autre hypothèse testée a été le coût des travaux, d'une part le coût des 6 postes constituant une rénovation complète et d'autre part le coût total à financer par le ménage (analyse complète au chapitre 10). Le graphique suivant présente la comparaison de ces coûts pour les maisons concernées avec la moyenne générale :

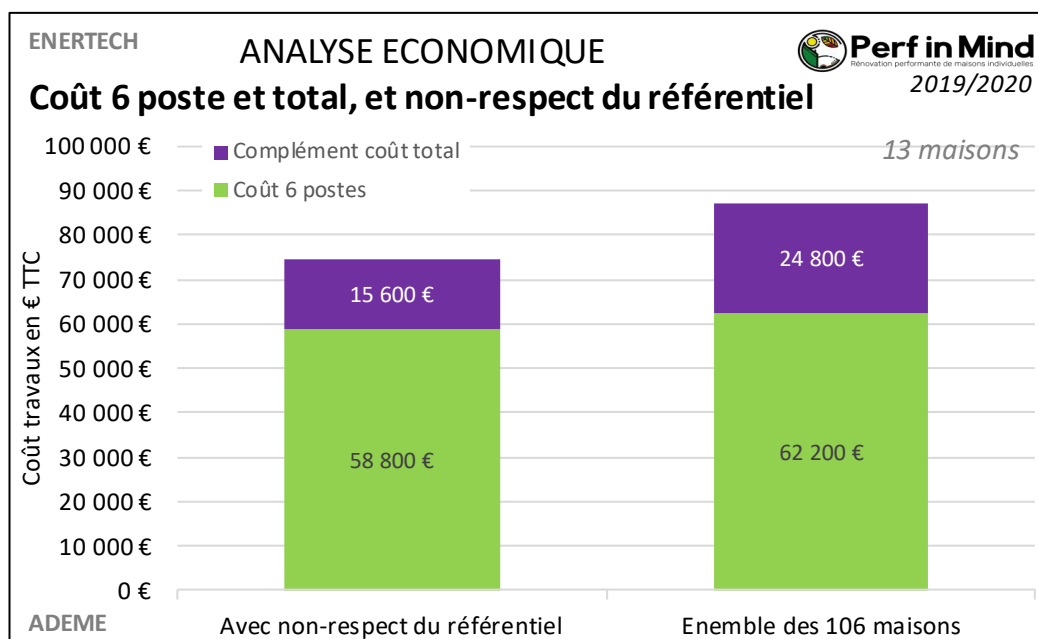


Figure 100 : Statistiques de coût travaux sur 6 postes et au total, pour l'ensemble des 106 maisons (à droite) et pour les 13 maisons n'ayant pas respecté leur référentiel (à gauche).

On note que les rénovations n'ayant pas respecté leur référentiel sont en moyenne moins chères que l'ensemble de l'échantillon, que ce soit sur le périmètre des 6 travaux constituant une rénovation complète ou sur l'ensemble des coûts à financer. Il ne semble pas y avoir de surcoût particulier justifiant de devoir dégrader la performance visée pour raisons économiques.

L'analyse de ces deux hypothèses n'est donc pas concluante. **Nous n'avons pas d'explication quand aux raisons qui ont conduit au non-respect du référentiel énergétique sur ces 13 maisons.** Ce sujet mériterait une investigation complémentaire.

3 Les systèmes

3.1 Ventilation

3.1.1 Type de ventilation avant / après travaux

Avant travaux, seuls 31% des logements étaient équipés d'une ventilation mécanique, quasiment exclusivement d'une ventilation simple flux (sauf un logement en double flux à faible efficacité).

Après rénovation, quasiment tous les logements possèdent un système de ventilation. On distingue :

- La **VMC simple flux** : un extracteur met le bâtiment en dépression en collectant l'air par des bouches localisées dans les pièces humides (cuisine, salle de bains, WC). La circulation d'air est ainsi à sens unique, les bouches d'entrée d'air étant situées sur les fenêtres des pièces de vie (chambre, séjour, etc.).
 - o Dans le cas de la ventilation **simple flux autoréglable**, les débits sont constants, ce qui assure une bonne qualité d'air intérieur mais provoque des pertes thermiques importantes.
 - o Dans le cas de la **ventilation hygroréglable**, les bouches d'extraction font théoriquement diminuer les débits lorsque l'humidité relative diminue. Si la ventilation est de type hygro B, les entrées d'air sont également hygroréglables ce qui = permet théoriquement de répartir la ventilation dans les pièces de vie en fonction des besoins (lorsque l'humidité relative d'une pièce augmente du fait de l'entrée de personnes, l'entrée d'air hygroréglable est censée augmenter le débit d'entrée d'air dans cette pièce au détriment des autres pièces non occupées).
 - o Le cas particulier des **extractions ponctuelles** comporte un petit ventilateur par pièce humide, qui est généralement piloté manuellement ou avec une temporisation.
- La VMC simple flux par **insufflation** : un ventilateur met la maison en surpression, et l'air sort au-dessus des fenêtres. Selon les configurations l'air peut être insufflé dans le couloir central et sortir au niveau des fenêtres de toutes les pièces (ce qui nécessite en principe d'augmenter les débits).



Figure 101 : Illustration de caissons d'extraction simple flux (gauche) et de centrales double flux (droite)

- La **VMC double flux** dispose d'un ventilateur de soufflage (pour les pièces sèches) et d'un ventilateur d'extraction (pour les pièces humides). La maison est théoriquement en équilibre de pression avec l'extérieur, ou en légère surpression selon la préconisation de certains fabricants. La VMC double flux dispose d'un échangeur thermique qui permet en hiver de récupérer la chaleur de l'air sortant pour la distribuer à l'air entrant (provenant de l'extérieur). De cette manière, l'air neuf arrive quasiment à la même température que l'air sortant. De la même façon l'échangeur permet en été de récupérer la fraîcheur s'il fait plus frais dedans que dehors, et généralement un by-pass est prévu pour faire entrer l'air frais la nuit s'il fait meilleur dehors.

Dans les maisons suivies dans ce projet les types de ventilation sont les suivants :

- **Simple flux** dans 57% des cas (47% de modèle hygroréglable, 4% de modèle autoréglable, 1 maison équipée d'extractions ponctuelles, le type étant indéterminé pour 4% des maisons), et simple flux par insufflation pour un logement,
- **Double flux** dans 42% des cas.
- Il reste une maison en ventilation naturelle (qui n'a pas respecté les préconisations de l'audit pour atteindre le niveau BBC).

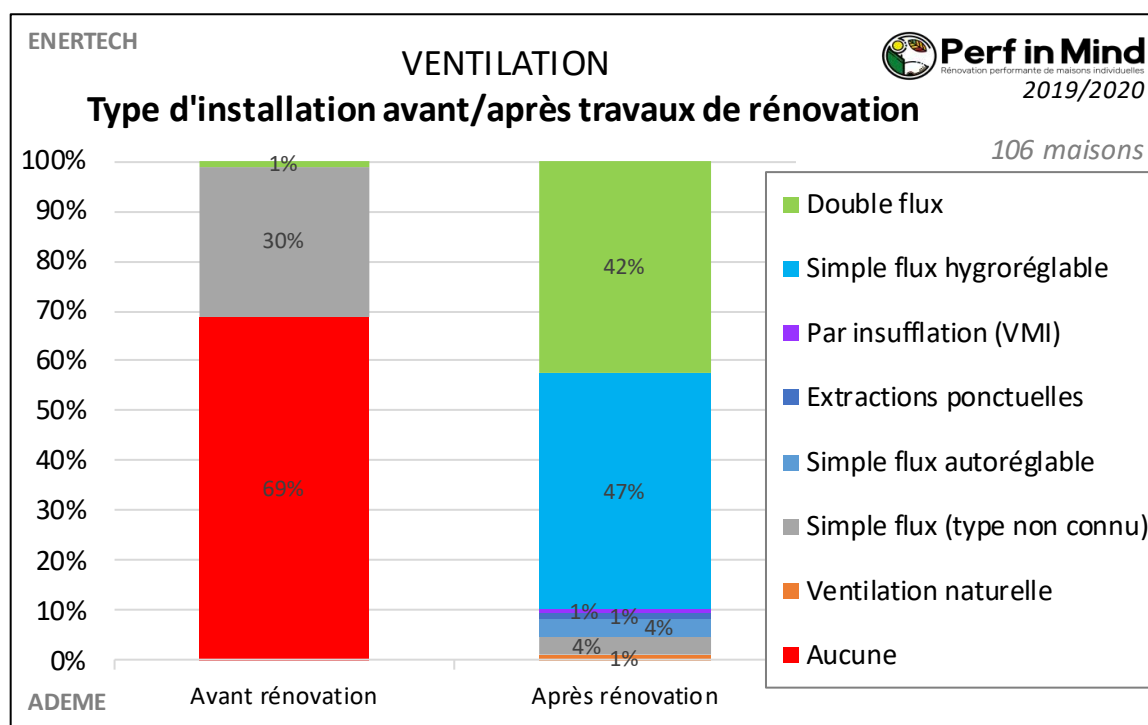


Figure 102 : Graphique des types de ventilation avant et après rénovation.

Si l'on distingue les maisons par mode de définition de la performance, on note des écarts entre les dispositifs :

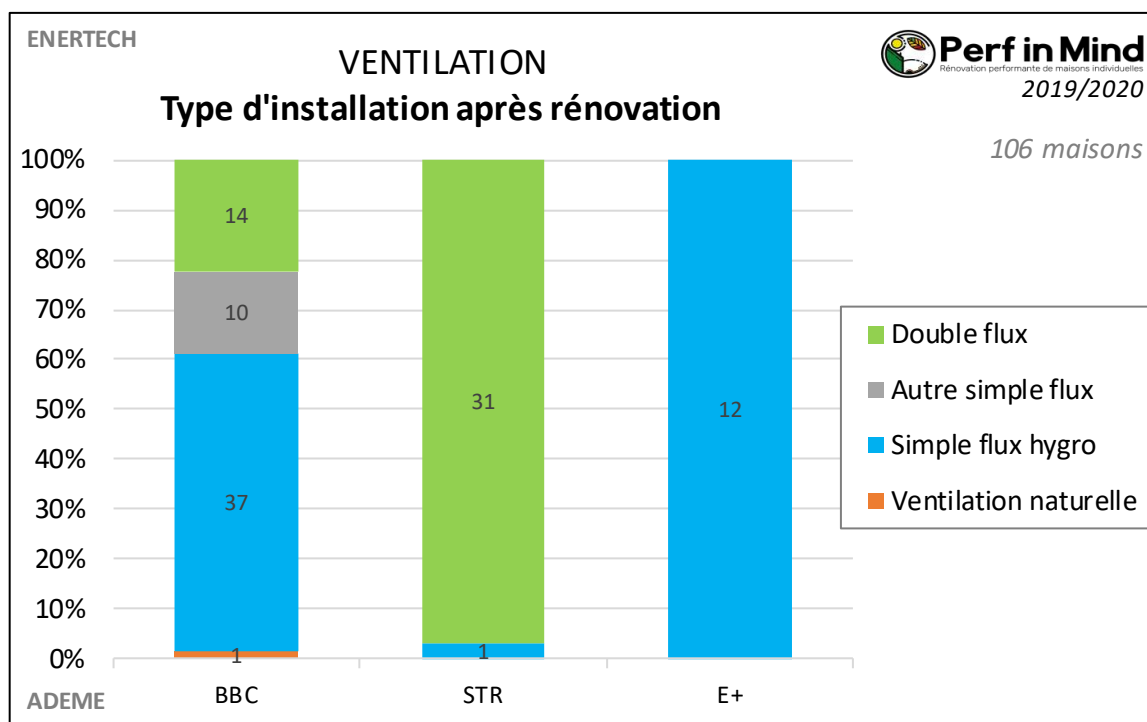


Figure 103 : Graphique des types de ventilation après rénovation selon le mode de définition de la performance.

Pour les 62 rénovations conçues avec l'objectif BBC, 23% des maisons sont en double flux, 76% en simple flux dont 60% en hygroréglable.

La part de ventilation double flux monte à 97% pour les rénovations conçues avec les STR (voir §1.3.2). Une seule maison est en simple flux hygroréglable. Il existe en effet des STR en simple flux, qui sont très exigeantes sur l'enveloppe pour compenser la moindre performance de la ventilation. En l'occurrence, cette maison n'a en fait pas respecté la STR choisie (STR non conforme).

L'opération de 12 maisons visant le niveau Energie positive (E+) a été conçue avec une ventilation simple flux hygroréglable.

3.1.2 Détails techniques des VMC

La Figure 104 ci-dessous donne les constructeurs et les références des différentes ventilation pour lesquelles il a été possible de les relever (suivi « avancé »).

Une centrale double flux a été « faite maison » par le propriétaire.

Les réseaux de ventilation circulent en volume chauffé pour 15 maisons en double flux sur 18 (83%). Au contraire, le réseau passe en volume non chauffé pour les 6 maisons où ces données ont pu être collectées.

Logement	Type de ventil	Marque	Référence	Cheminement des réseaux
200205	Simple flux	ALDES	compact	Volume non chauffé
200508	Simple flux	ALDES	Microwatt hygrob	Volume non chauffé
200201	Simple flux	ATLANTIC	Hygrocosy BC	Volume non chauffé
200405	Simple flux	ATLANTIC	HYGRO COSY MINI BC	Volume non chauffé
200510	Simple flux	Atlantic	Hygro cosy BC	Volume non chauffé
200405	Simple flux	OLYMPIC	VMC PAVILLON OLYMPIC 2SP P=30W	Volume non chauffé
200102	Double flux	ALDES	DEEFLY CUBE	Non connu
200104	Double flux	ALDES	CUBE 300 HEMW	Volume chauffé
200310	Double flux	ALDES	Dee Fly cube 300	Volume chauffé
200404	Double flux	ALDES	INSPIRAIR HOME S	Volume chauffé
200403	Double flux	ATLANTIC	DUOCOSY	Volume chauffé
200406	Double flux	ATLANTIC	DUOCOSY HR	Volume chauffé
200504	Double flux	ATLANTIC	Primocosy HR	Volume chauffé
200507	Double flux	ATLANTIC	DUOLIX MAX	Volume chauffé
200305	Double flux	DANTHERM	HCV 5	Volume chauffé
200302	Double flux	Fait maison		Volume non chauffé
200301	Double flux	FRANCE AIR	Cocoon 3	Volume non chauffé
200303	Double flux	HELIOS	KWLEC270WL	Volume non chauffé
200304	Double flux	HELIOS	KWLEC500WR	Volume chauffé
200308	Double flux	HELIOS	KWL EC 300 WR	Volume chauffé
200103	Double flux	NATHER		Volume chauffé
200307	Double flux	VENTILAIR	SENTINEL KINETIC	Volume chauffé
200101	Double flux	ZEHNDER	COMFO AIR 350 FR R	Volume chauffé
200306	Double flux	ZEHNDER	ComfoAir Q350	Volume chauffé
200407	Double flux	ZEHNDER	COMFO AIR 350 FR R	Volume chauffé

Figure 104 : Tableau des Marque et référence des ventilations (25 maisons)

3.1.3 Débits mesurés et renouvellement d'air attendu

Méthodologie : Une mesure de débit instantanée sur l'ensemble des bouches a été réalisée à la pose et à la dépose des capteurs pour les **38 maisons en suivi « avancé »**.

Le débit pris en compte ici est le **maximum** entre soufflage et extraction. En effet, si le débit de soufflage est supérieur à la reprise, la différence va sortir de la maison par les défauts d'étanchéité à l'air. Inversement si le débit d'extraction est supérieur, de l'air va rentrer par infiltration. Dans les deux cas, c'est bien le maximum du débit qui est à prendre en compte aussi bien du point de vue de la qualité d'air intérieur que de la charge thermique pour le chauffage. Nous verrons en détail au [§4.2.4](#) que des écarts importants peuvent exister entre soufflage et reprise et que cela dégrade l'efficacité réelle de l'échangeur double flux.

Lorsque des bouches étaient inaccessibles (6 bouches sur les 280 de l'échantillon), le débit de la pièce la plus proche en termes d'utilisation et de proximité a été pris en compte (par exemple si une chambre n'a pas pu être mesurée alors le débit de la chambre à proximité a été pris en compte).

On voit Figure 105 que les débits mesurés par logement vont de 39 à 224 m³/h (moyenne des débits entre pose et dépose) avec une moyenne de 105 m³/h. La moyenne des débits s'établit à **133 m³/h pour les ventilations double flux** et **80 m³/h pour les simples flux**.

Entre la pose et la dépose le débit a baissé de 2% mais cette valeur cache des disparités importantes avec des baisses et des hausses pouvant aller respectivement jusqu'à -46% et +54%.

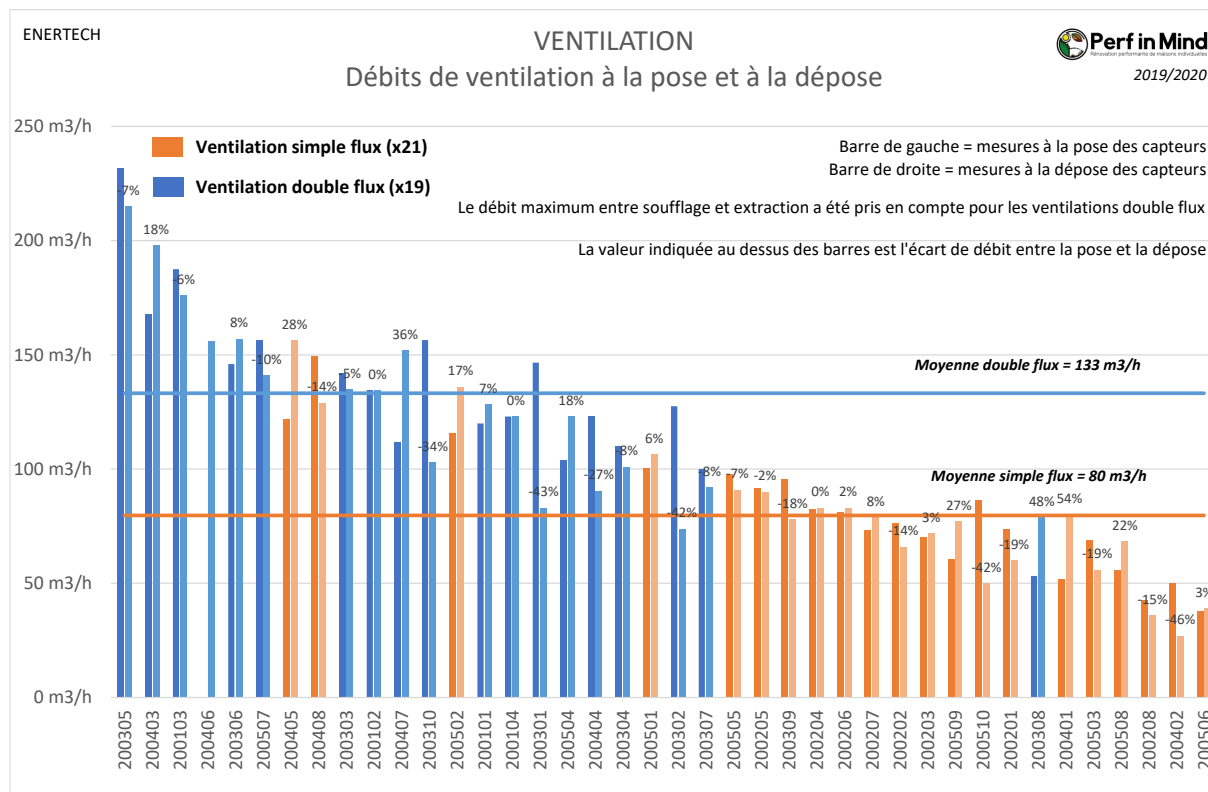


Figure 105 : Ventilation – Débits de ventilation mesurés à la pose et à la dépose

Les débits sont normalement choisis en fonction du nombre de pièces sèches et humides de la maison. Nous n'avions pas accès aux débits attendus opération par opération. En revanche, il est possible de raisonner en **renouvellement d'air**, soit le débit de ventilation divisé par le volume de la maison (SHAB x hauteur sous plafond moyenne). On peut alors estimer le renouvellement d'air attendu selon le type de ventilation.

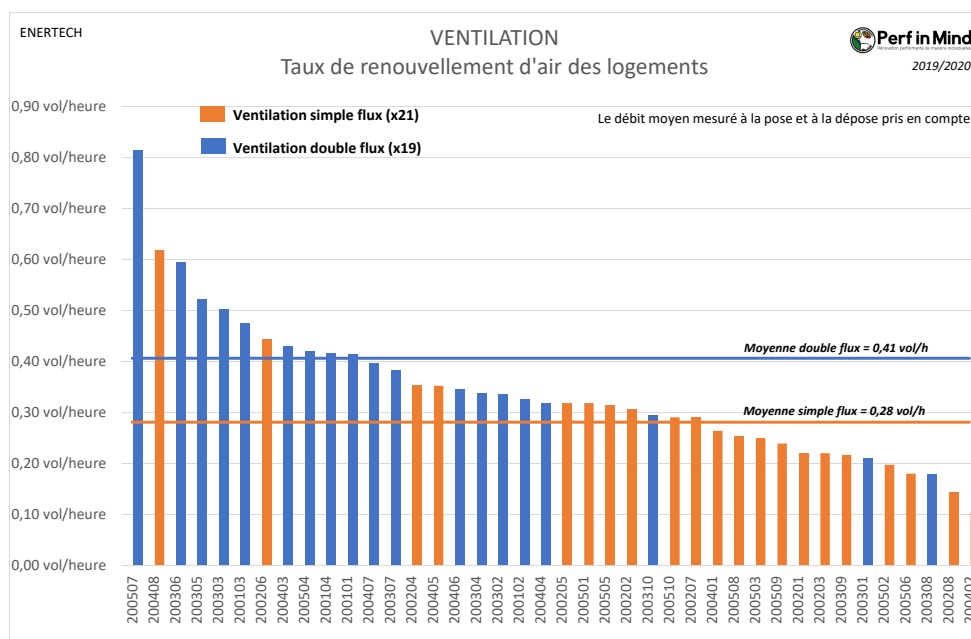


Figure 106 : Ventilation -Taux de renouvellement d'air par la ventilation

En moyenne pour l'ensemble des maisons, le renouvellement d'air est de 0,34 vol/h avec des extremums de 0,10 et 0,82 vol/h. La moyenne des **ventilations double flux s'établit à 0,41 vol/h**, alors que le débit attendu pour ce type de ventilation était plutôt de 0,5 vol/h. Seules 7 installations de ventilation double flux sur 19 ont un renouvellement d'air compris entre 0,4 et 0,55 vol/h.

Pour les ventilations simple flux le renouvellement moyen est de **0,28 vol/h**, ce qui est proche de la valeur attendue en hygroréglable (0,3 vol/h) mais pas en autoréglable (où l'on attend aussi 0,5 vol/h). Cette moyenne cache des disparités importantes, avec des renouvellements d'air parfois très faibles, mais aussi très élevés. Seules 11 ventilations simple flux sur 21 ont un renouvellement d'air compris entre 0,25 et 0,35 vol/h.

En croisant ces mesures et le questionnaire de satisfaction sur l'acoustique de la ventilation, on note que 2 des 3 rénovations ayant les taux de renouvellement d'air les plus élevés ont une acoustique jugée « Pas du tout satisfaisante ». L'échantillon est trop limité pour en tirer des généralités, mais techniquement les sur-débits de ventilation sont clairement une des causes possibles d'inconfort acoustique.

La Figure 107 donne le débit moyen pour chaque pièce observée (en orange) et le cumul des débits par type de pièce en bleu (par exemple la somme des débits moyens de toutes les chambres).

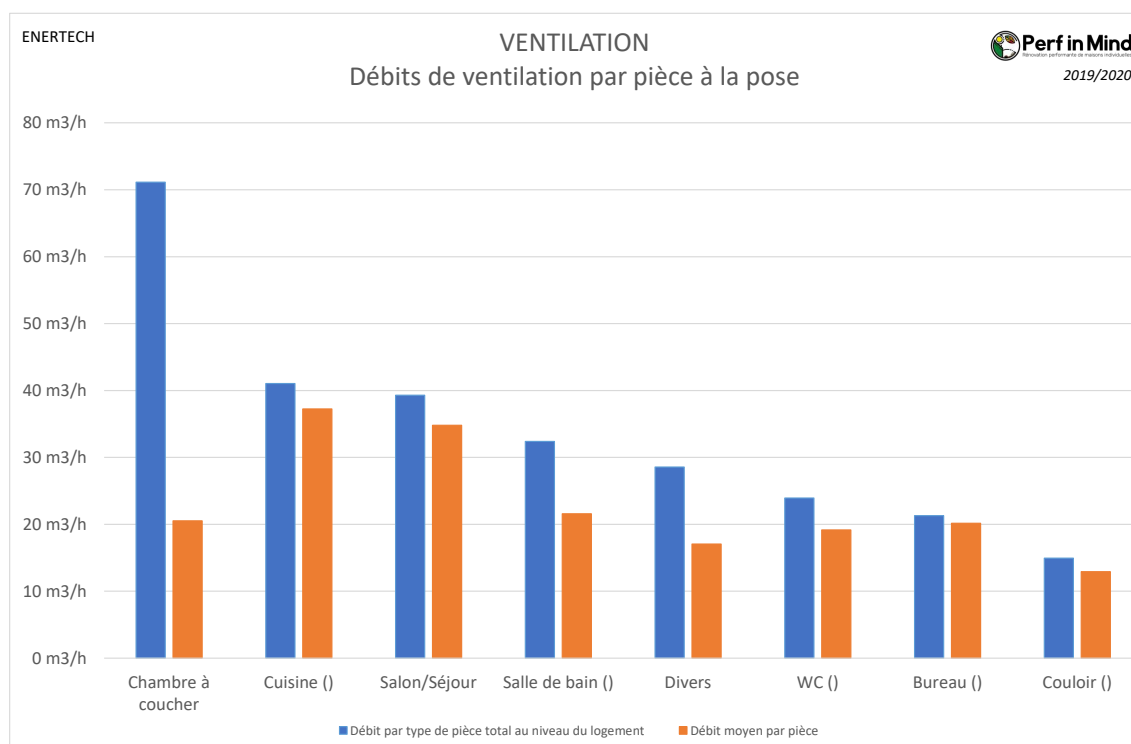


Figure 107 : Ventilation - Débits de ventilation par pièce à la pose

A l'exception de la cuisine et du séjour, le débit par pièce se situe autour de **20 m³/h**, ce qui est l'ordre de grandeur courant. Pour mémoire 18 m³/h par personne assurent un taux de CO₂ de 1300 ppm, donc ce débit est adapté pour une chambre pour une personne, mais nous semble à augmenter pour la chambre parentale.

3.2 Chauffage

3.2.1 Production de chaleur avant/après travaux

Le graphique de la Figure 108 indique l'énergie de chauffage des logements de l'échantillon avant/après travaux de rénovation. Ces données sont issues du questionnaire rempli par les ménages.

Après travaux, plus aucun logement n'est chauffé au fioul, propane ou charbon. Ces énergies étaient pourtant utilisées dans 19% des maisons avant travaux.

On note un nombre stable d'installations de chauffage au gaz. Dans le même temps le nombre d'opérations dont le chauffage principal est fait à partir d'électricité a augmenté de 36% et on passe de convecteurs électriques à des pompes à chaleur. On observe également une forte augmentation du bois comme mode de chauffage principal : une seule installation avant travaux et 19 après (12 bois granulés et 7 bois bûches).

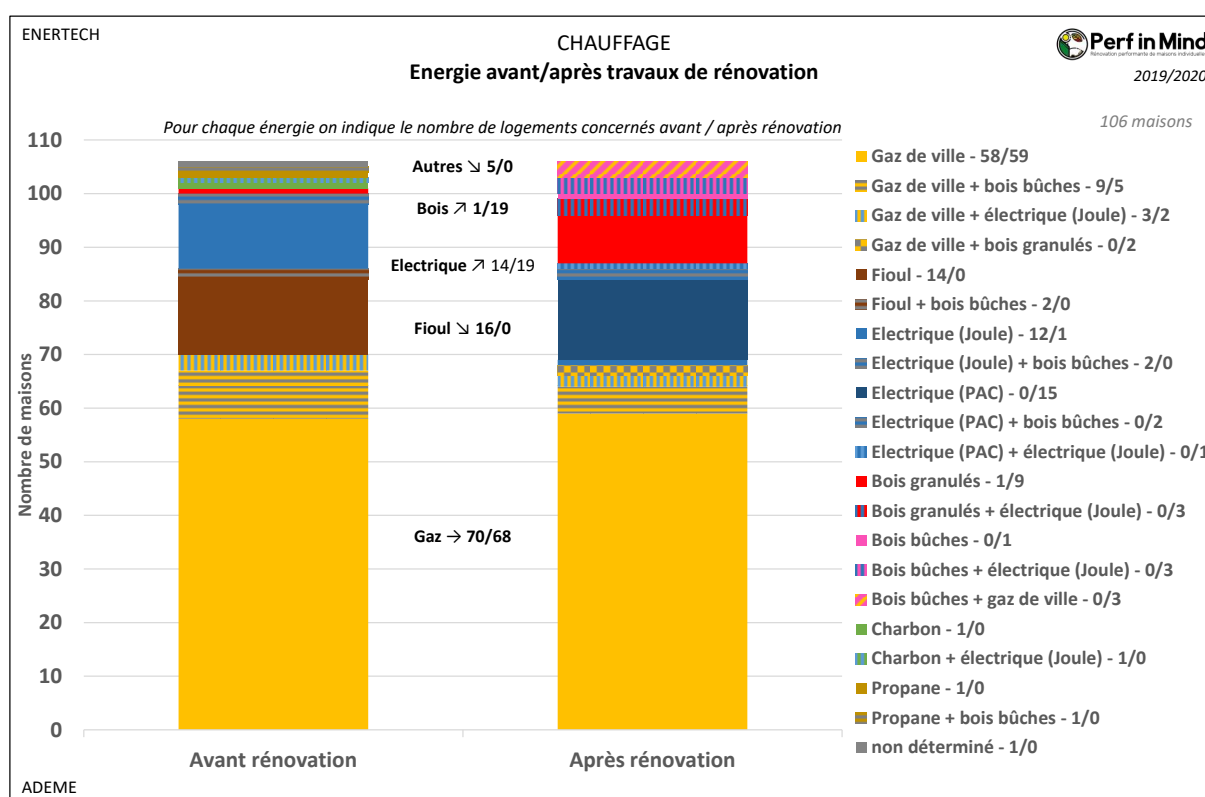


Figure 108 : Graphique des énergies de chauffage avant et après rénovation.

Dans 73% des logements, la production de chaleur a été remplacée. Dans 17% des cas, elle a été conservée et dans 10% elle n'a pas été changée mais a été aménagée.

67% des logements sont équipés de chaudières, dont 3% bois granulés. Ce sont les modèles à condensation qui dominent (50% des logements, soit 75% des chaudières). Les poêles granulés ou bûches et les pompes à chaleur sont à égalité, les seconds systèmes les plus utilisés (14% chacun).

Pour rentrer plus en détail dans les systèmes après rénovation, nous avons mobilisé les données de l'inventaire réalisé à partir des factures, devis et études, complété par les visites sur site pour les maisons en suivi « avancé ». En effet celles-ci nous semblent plus fiables que celles du questionnaire. Quelques écarts peuvent d'ailleurs être constatés dans la comparaison avec le graphique précédent.

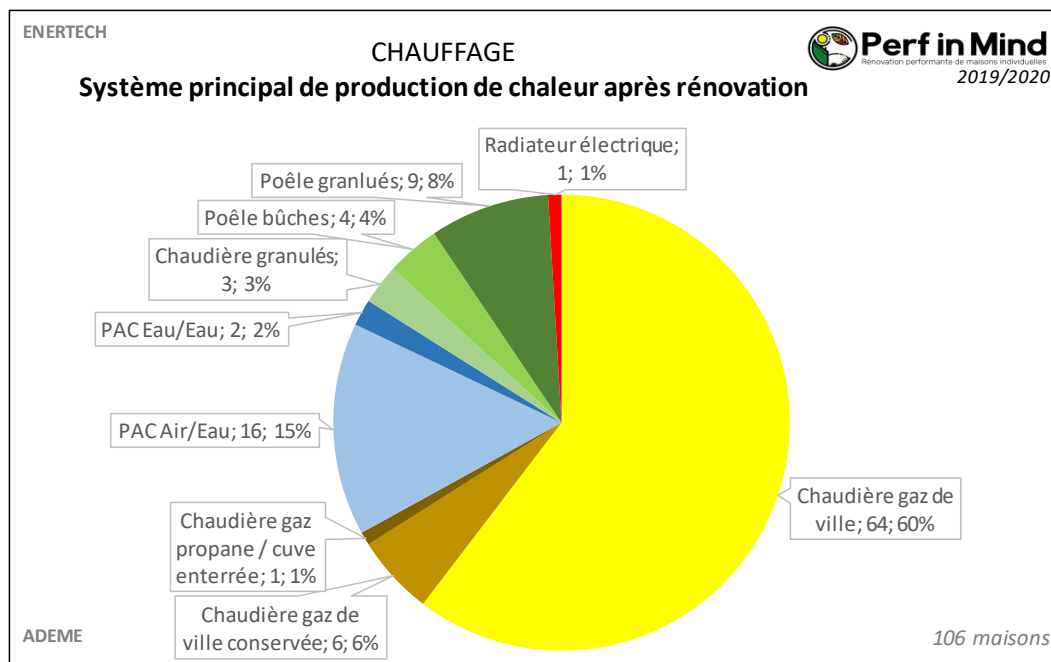


Figure 109 : Graphique des systèmes principaux de chauffage après rénovation.

Après rénovation, 67% des maisons sont équipées de **chaudières gaz**, toutes sauf une étant raccordées au gaz de ville. Pour 6%, la chaudière existante a été conservée. Les données du questionnaire précisent que (selon les ménages) 78% seraient à condensation, 6% à basse température et 16% seraient des chaudières standard.

Les **pompes à chaleur (PAC)** représentent 17% des modes de chauffage principaux. Quasiment toutes sont des PAC air-eau, sauf 2 qui sont des PAC géothermiques (eau-eau).

Le **chauffage biomasse** est utilisé dans 15% des projets. Il s'agit principalement de poêles à granulés (8%) et de poêle à bois (4%). 3 projets sont équipés d'une chaudière à granulés.

Un seul logement est équipé uniquement de **radiateurs électriques** après rénovation.

Si l'on s'intéresse aux **chauffages d'appoint**, la Figure 110 montre qu'un supplément de 7% des maisons sont équipées de radiateurs électriques, qui viennent en appoint d'un poêle à bois (3 cas), d'une chaudière gaz (3 cas), ou d'une PAC eau-eau (1 cas). Globalement il est intéressant de noter que dans le cadre de ces rénovations performantes le chauffage par radiateur électrique passe du statut de chauffage principal (le cas échéant) à celui de chauffage d'appoint (à 1 exception près).

15% sont équipés d'un chauffage d'appoint au bois, principalement un poêle (14 cas), mais aussi un insert (1 cas) ou une cheminée ouverte (1 cas). Ces équipements viennent principalement en appoint d'une chaudière gaz (14 cas) mais aussi d'une PAC air-eau (2 cas).

78% des maisons ne sont pas équipées d'un chauffage d'appoint.

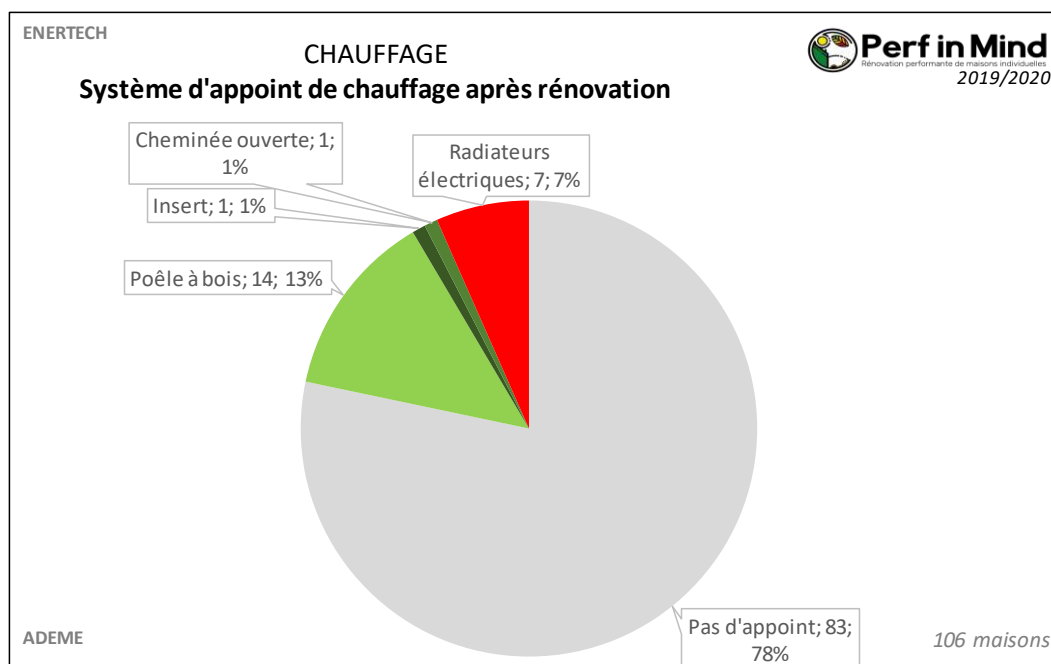


Figure 110 : Graphique des systèmes d'appoint de chauffage après rénovation.

3.2.2 Emission de chaleur

Dans plus des trois quarts des logements les principaux émetteurs de chaleur sont des radiateurs.

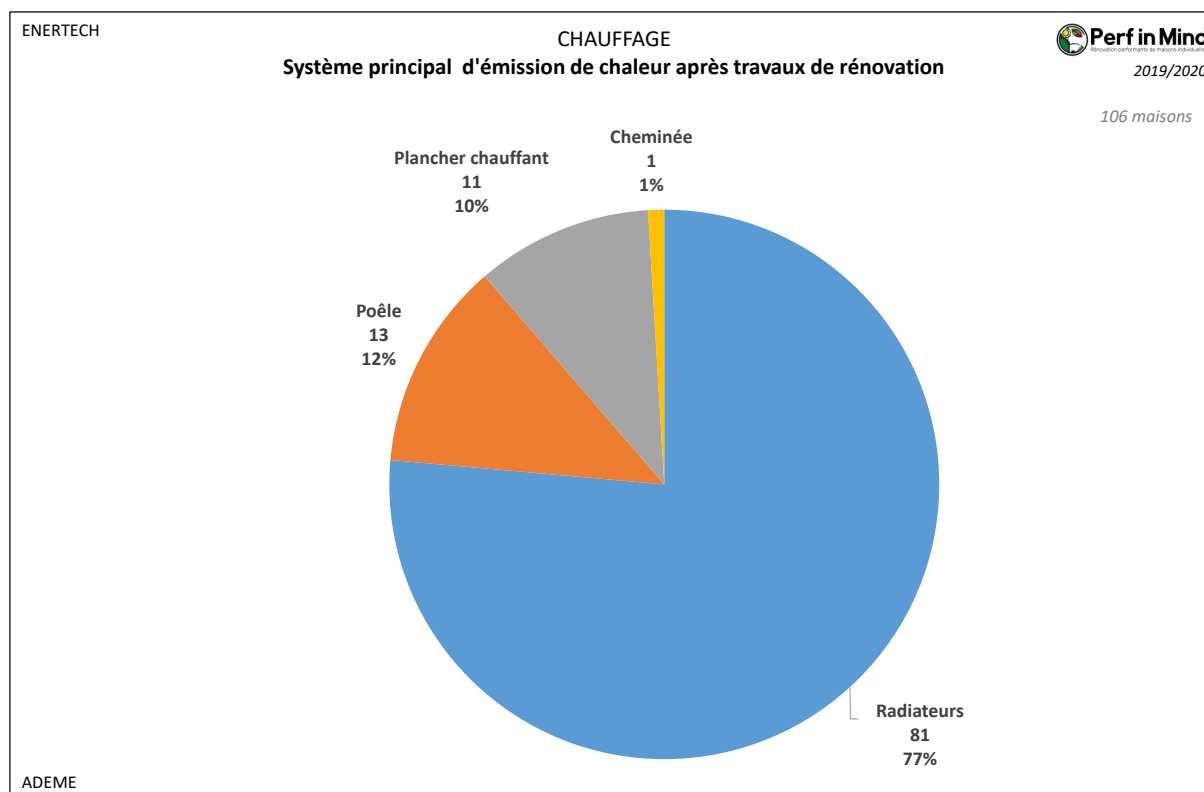


Figure 111 : Graphique des principaux émetteurs de chauffage après rénovation.

3.2.3 Modes de régulation

Sur la question des modes de régulation, les réponses au questionnaire ne nous semblent pas fiables. Ceci est une information en soi, qui fait écho à la difficulté d'appropriation des systèmes par les ménages (voir à ce sujet le §1.5.2). Les données présentées ici sont donc issues de l'inventaire réalisé à partir des factures, devis et études, complété par les visites sur site pour les maisons en suivi « avancé ». Ces données ont pu être collectées de façon fiable sur 74 maisons.

Illustration des systèmes de régulation observés sur les logements suivis avancé :



Figure 112 : Illustration : Exemple de programmation horaire d'un poêle à granulés.



Figure 113 : Illustration : Exemple de thermostat pour chaudières gaz.

Les installations dont la régulation est décrite ici sont principalement des chaudières gaz (qui constituent près des 2/3 des systèmes de chauffage après rénovation, voir [§3.2.1](#)) ainsi que des chaudières à granulés. Sur l'ensemble de ces chaudières, 82% ont leur production régulée a minima par des robinets thermostatique, 80% par un thermostat d'ambiance, 65% par une programmation horaire et 55% par une loi d'eau.

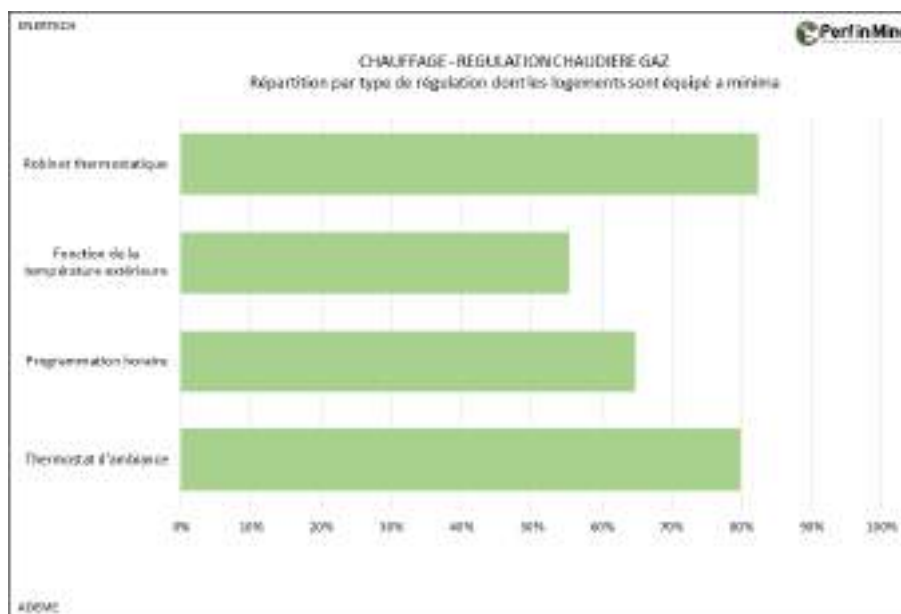


Figure 114 : Graphique des types de régulation du chauffage installés après rénovation.

Une même maison peut être équipée de plusieurs dispositifs de régulation. La Figure 115 ci-dessous précise le cumul des systèmes de régulation maison par maison.

On note que près d'un tiers (30%) des logements décrits ici disposent de 4 éléments de régulation (thermostat d'ambiance, robinet thermostatique, programmation horaire et sonde de température extérieure).

Un autre petit tiers (30%) de ces mêmes logements disposent de 3 éléments de régulation et un dernier petit tiers (30%) de deux éléments. Les 10% restants ne sont équipés que d'un organe de régulation.

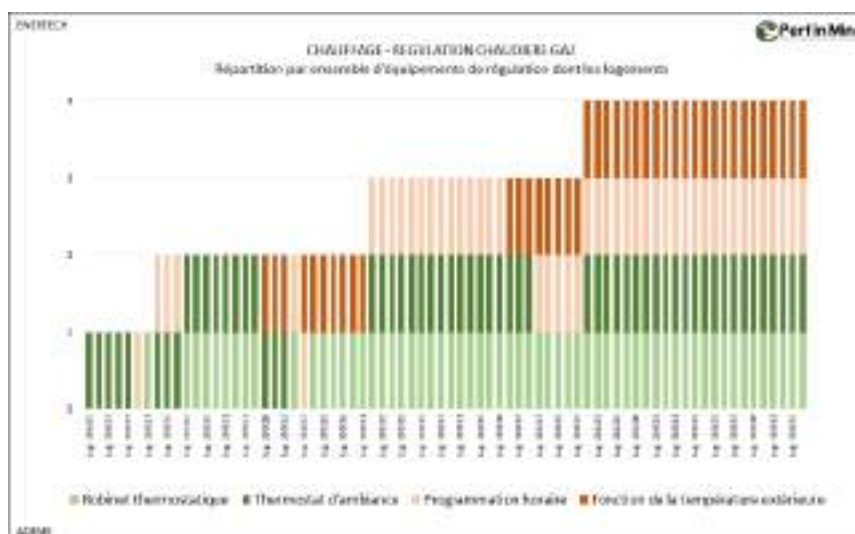


Figure 115 : Graphique du cumul des équipements de régulation du chauffage maison par maison (74 maisons).

Dans le détail, 2 logements ne sont pilotés que par une programmation horaire et/ou une loi d'eau, sans aucune régulation terminale. 13 logements n'ont que des robinets thermostatiques comme régulation terminale, généralement avec une programmation horaire et/ou une loi d'eau.

80% des maisons disposent d'un thermostat d'ambiance, soit une régulation terminale performante (dans les bâtiments performants, les robinets thermostatiques ne permettent pas une valorisation effective des apports gratuits). Cependant 30 maisons n'ont pas de loi d'eau, ce qui ne permet pas de maximiser le rendement de la chaudière.

29 maisons sur 74 (40%) disposent à la fois d'un thermostat et d'une loi d'eau, ce qui nous semble la régulation minimale pour assurer la performance du chauffage.

Pour l'évaluation par la mesure du fonctionnement de ces systèmes, voir le [§4.2.5](#).

3.3 Production d'Eau Chaude Sanitaire

3.3.1 Production d'ECS avant/après travaux

Le système de production d'ECS a été conservé dans moins d'un quart des logements (24 maisons).

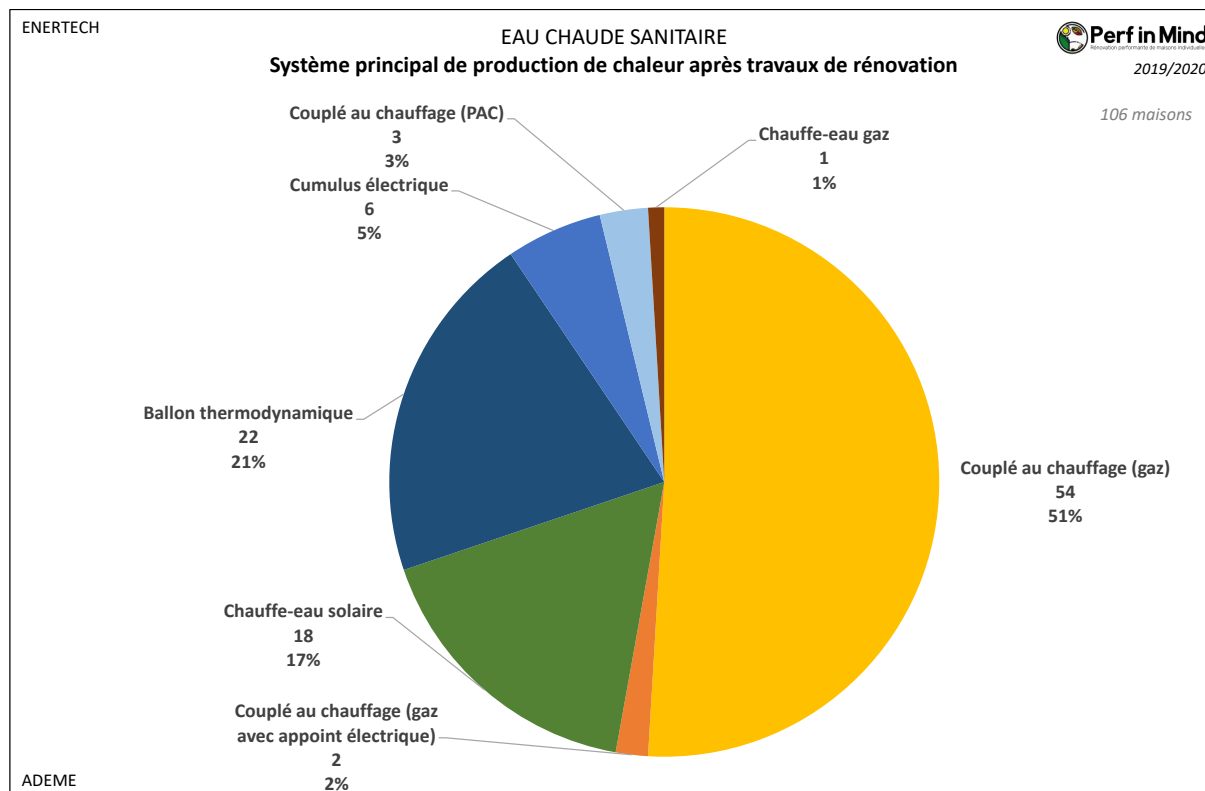


Figure 116 : Graphique des principaux systèmes d'eau chaude sanitaire (ECS) après rénovation.

La production de chaleur est faite dans

- 54% des cas au gaz, pratiquement toujours à l'aide de la chaudière qui assure le chauffage (1 exception équipée d'un chauffe-eau au gaz),
- 29% des cas à l'électricité (20,8% ballon thermodynamique, 2,8% couplé au chauffage par PAC, 5,7% cumulus)
- 17% des cas à l'énergie solaire. Pour 11 des 18 chauffe-eaux solaire, l'appoint est fait par la chaudière qui assure le chauffage (dans un cas -chaudière granulés- il y a également un appoint électrique). Dans les 7 autres cas, l'appoint est électrique. La surface de panneaux solaires a été indiquée par 17 des 18 propriétaires. Elle va de 1 à 9m². La surface moyenne installée est de 4m². 6 maisons possèdent cette surface, 4 sont équipées de 2m² et 5 entre 5 et 9m².

NB : comme point de comparaison, on considère en général qu'un seul capteur (soit 2 à 3 m²) est suffisant pour un ménage moyen. Certaines installations sont donc plus importantes, ce qui permet un meilleur taux de couverture d'ECS solaire (nous verrons au §5.1.1 qu'il atteint 100% pour certaines maisons). Il peut exister un risque de surchauffe estival des capteurs avec de telles surfaces, sauf si les capteurs sont auto-vidangeables ou s'il est prévu un système de décharge. Nous ne disposons pas de ce niveau de détail pour toutes les maisons concernées.

3.4 Installation photovoltaïque

Sur l'ensemble des 106 maisons, 16 au total disposent d'une installation photovoltaïque, généralement intégrée en toiture. Dans un cas elle est intégrée sur une pergola. Parmi ces 16 maisons, 12 sont les maisons de l'opération EnergieSprong (photo de gauche ci-dessous).



Installation photovoltaïque du projet EnergieSprong (12 maisons en bande). Source : <http://www.energiesprong.fr/>



Installation photovoltaïque semi-transparente sur pergola bois

Figure 117 : Exemple de photos d'installations photovoltaïques.

La puissance installée par maison varie de 3 kWc à un peu plus de 9 kWc. Cette dernière valeur concerne l'opérations EnergieSprong, qui vise un bilan à énergie positive, et où les deux pans de toiture sont équipés de capteurs photovoltaïques.

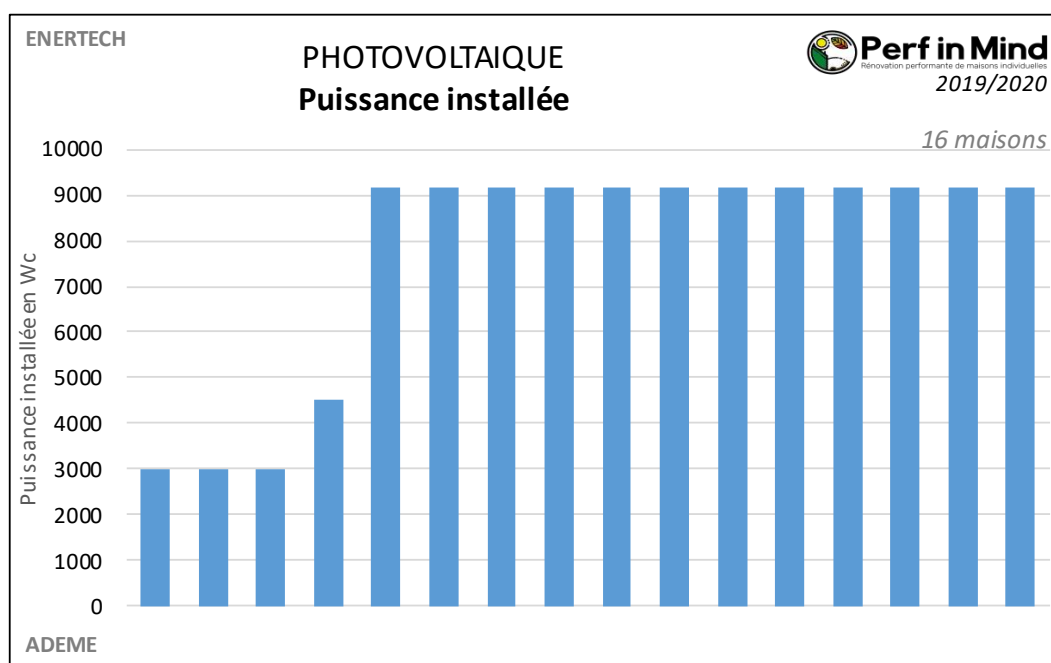


Figure 118 : Graphique des puissances photovoltaïques installées sur les 16 maisons concernées.

La production de ces installations, lorsqu'elle est connue, sera présentée au §7.5.

CONSOMMATIONS

Méthodologie

Métérologie

La mesure des consommations de chaleur/électricité et du confort dans les logements rénovés de l'échantillon constitue le cœur du retour de terrain du projet.

Les consommations ont pu être mesurées en détail dans 38 logements dits « avancés » (numérotation 200xxx) et elles ont été déterminées à partir de relevés de compteurs dans 68 logements dits « base » (numérotation 300xxx).

La mesure a été effectuée sur **1 année complète**. La période de mesure va **d'avril 2019 à mars 2020** inclus pour la plupart des logements suivis. Elle a pu être décalée d'un mois en amont ou en aval selon la qualité des relevés (concerne 15 maisons en suivi avancé). Pour les 12 maisons EnergieSprong, l'année de mesure a été d'octobre 2019 à septembre 2020.

La période de mesure a ainsi recoupé une part ou la totalité (pour les 12 maisons EnergieSprong) du 1er **confinement lié à la pandémie de COVID 19**, qui a eu lieu du 17 mars au 11 mai 2020.

La méthodologie d'instrumentation des logements est exposée en détail dans des livrables intermédiaires dédiés⁸.

Nous résumons succinctement les usages suivis dans le tableau ci-dessous :

	Chaleur (Chauffage, climatisation ECS)	Auxiliaires	Confort
Logements avancés (750 points de mesure pendant 1 an)	- Mesure de la consommation de chaleur en énergie finale (suivi électrique en tableau, suivi compteur gaz, poids du bois). - Ajout d'un compteur de chaleur (instrumenté) pour séparer le chauffage de l'ECS en cas de générateur mixte. - Suivi électrique en tableau des productions chauffage et/ou ECS joules et thermodynamiques. - Compteur de chaleur ECS en sortie de chaudière quand cela a été possible, sinon sur le tronçon de puisage en sortie de ballon. - Suivi électrique de la climatisation si présente. - Températures techniques sur l'ensemble de l'installation.	Mesure en tableau : - des consommations électriques des chaudières, pompes, ventilateurs, CTA. - Du général électrique du logement.	- 1 sonde de température + hygrométrie dans le séjour. - 1 sonde de température dans la chambre principale. - 1 sonde de CO2 dans la chambre principale. - Mesures de qualité d'air (formaldéhyde, COV, PF) pendant 1 semaine.
Logements Base	Relevé mensuel de l'ensemble des compteurs (gaz, électrique) par l'intermédiaire de l'occupant.	<i>Pas de mesure</i>	- 1 sonde de température + hygrométrie dans le séjour. - 1 sonde de température dans la chambre principale.

Figure 119 : Périmètre des usages mesurés dans les logements.

NB : les consommations d'éclairage n'ont pas été instrumentées. Le périmètre mesuré ne recoupe donc pas les « 5 usages » de la réglementation thermique.

⁸ Cf. Livrables J1 et D3.4

Méthodologie de traitement des données

Nous illustrons en Figure 120, à titre d'exemple, la méthode de détermination des différentes énergies dans le cas spécifique des logements avancés chauffés au gaz : chauffage en énergie utile/finale/primaire et ECS en énergie finale/primaire. L'ensemble des autres diagrammes ainsi que les renvois de texte sont fournis en [Annexe 2](#).

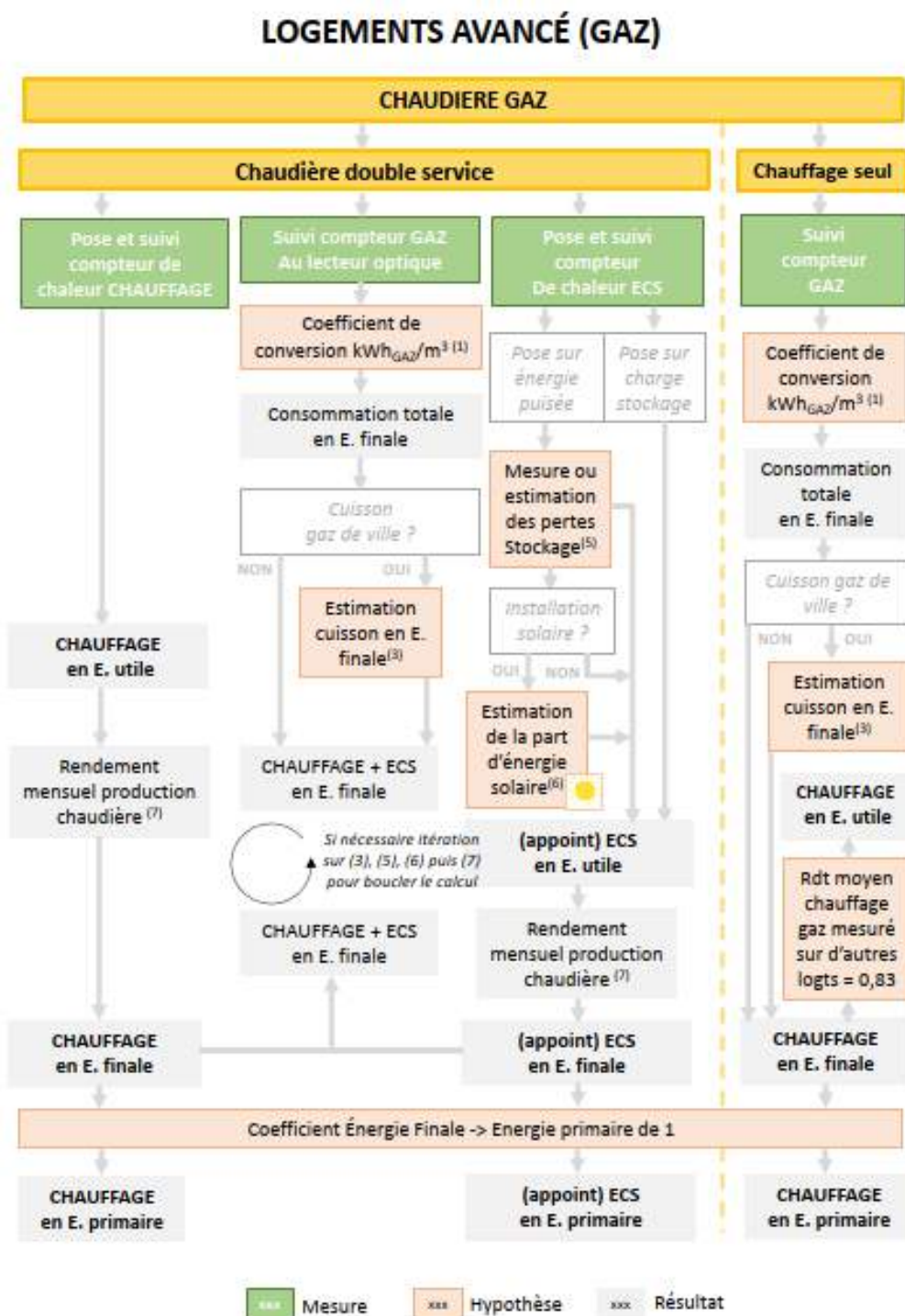


Figure 120 : Diagramme de traitement des données dans le cas des logements avancés au gaz (la mesure est indiquée en vert).

L'objectif du projet est bien de *mesurer* les consommations sur le terrain, toutefois chaque cas d'étude contient une part d'estimation et de calcul, pour extraire un usage (comme la cuisson), pour dégréver la part d'énergie solaire le cas échéant, pour remonter à l'énergie utile, etc. Voici quelques exemples concrets dans lesquels des hypothèses de calcul ont été nécessaires :

- Déterminer l'énergie finale de chauffage dans le cas d'un logement chauffé au gaz et utilisant aussi le gaz de ville pour le poste cuisson ;
- Déterminer l'énergie utile de chauffage dans le cas d'une PAC simple service ou d'une chaudière gaz en production chauffage seul, sachant qu'il n'y a pas de compteur de chaleur installé dans ce cas ;
- Déterminer l'énergie finale d'appoint ECS lorsque le compteur de chaleur ECS n'a pas pu être placé au niveau de la chaudière mais se situe sur le puisage du ballon de stockage ;
- Séparer les usages chauffage et ECS dans un logement base dont on ne dispose que de relevés mensuels du compteur gaz.

Même si nous pensons que ces estimations ne remettent aucunement en cause les ordres de grandeur présentés ni les enseignements tirés de l'étude, il faut garder en tête qu'il demeure une certaine « hétérogénéité de la part calcul » dans les consommations affichées, avec une part plus importante de calcul dans les logements « base ».

Nous faisons tout de même fait le choix de fournir les mêmes types de résultats pour l'ensemble des logements de manière à pouvoir dégager des tendances macroscopiques ce qui demeure l'objectif principal du projet.

Surfaces utilisées

Les consommations mesurées sont ramenées systématiquement aux **surfaces habitables** des logements.

Coefficients d'énergie primaire

A notre sens, les coefficients d'énergie primaire *réglementaires* sous-estiment la réalité physique du terrain (particulièrement le coefficient électrique). Cependant, afin de pouvoir comparer les résultats de l'étude à l'ensemble des référentiels utilisés dans le contexte de la rénovation (calcul BBC rénovation, DPE), nous avons utilisé les coefficients réglementaires en vigueur au moment de la conception des rénovations suivies, soit ceux du BBC rénovation basé sur le calcul RT2005-rénovation, à savoir :

- Electricité : coefficient 2,58
- Bois : coefficient 0,6
- Autres énergies : coefficient 1

Ponctuellement, un coefficient d'énergie primaire de 1 sera pris en compte pour le bois, notamment pour se comparer à l'échelle de l'ancien DPE ([§7.2](#)). De même pour l'échelle du nouveau DPE ([§7.3](#)), on utilisera 2,3 pour l'électricité et 1 pour le bois. Ceci sera précisé le cas échéant.

4 Chauffage

4.1 Consommation annuelle mesurée (utile, finale, primaire)

4.1.1 Chauffage en énergie utile

L'énergie *utile* de chauffage est celle qui qualifie le plus directement la qualité thermique de l'enveloppe même si elle est uniquement *estimée* à partir de la consommation en énergie finale dans un grand nombre de logements de l'échantillon (les logements « base » ainsi que certains logements « avancés » ne disposant pas de compteur de chaleur).

Les méthodes de détermination du besoin de chauffage en énergie utile à partir des mesures sont explicitées en [Annexe 2](#).

Le résultat global pour l'ensemble de projets est présenté en Figure 121.

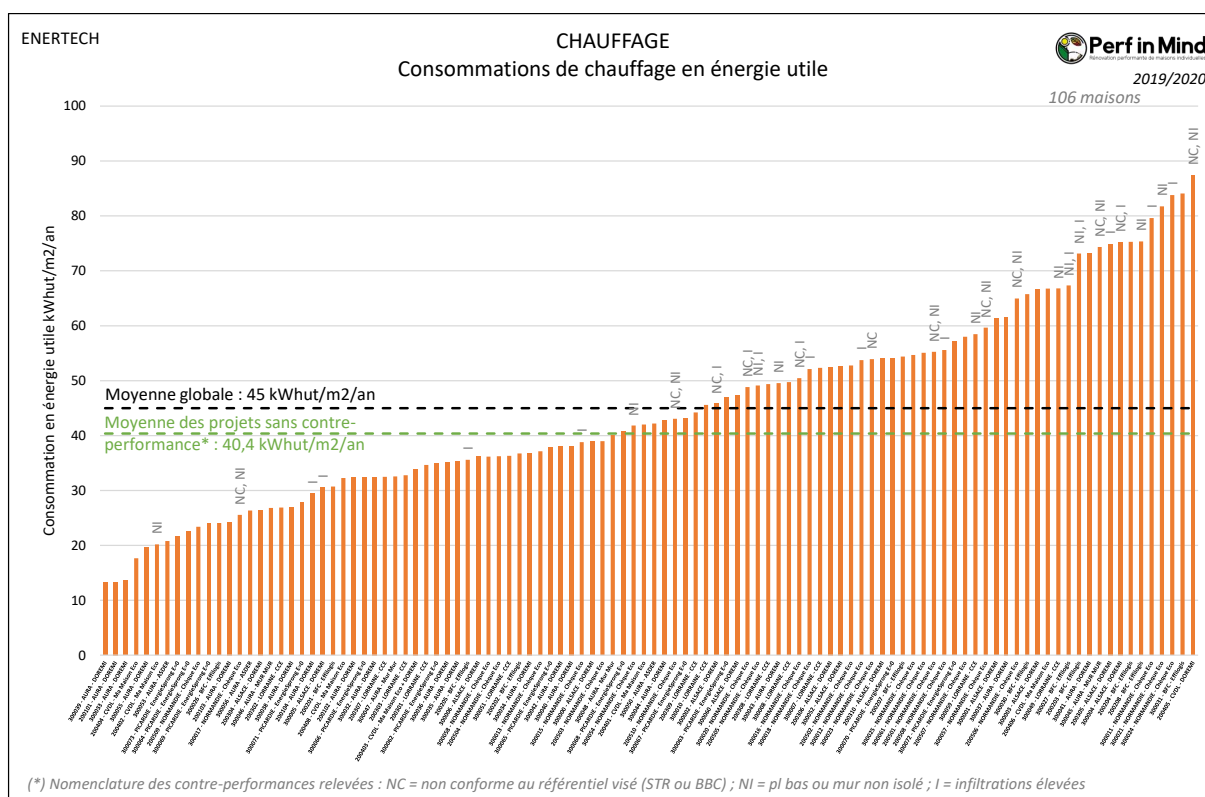


Figure 121 : Besoins de chauffage des logements issus de la mesure, avec mention des « contre-performances » (voir [§2.7.3](#))

Ce graphique nous fournit les résultats suivants :

- Le besoin de chauffage moyen des projets s'établit à 45,0 kW.h_{ut}/m²/an en moyenne globale ;
- L'étendue des besoins est très importante avec une variation de 1 à presque 7 (minimum 13 kW.h_{ut}/m²/an, maximum 87 kW.h_{ut}/m²/an) ;
- Il n'y a pas réellement de palier et toutes les valeurs intermédiaires sont représentées.

Si l'on extrait les projets comportant des motifs de « contre-performance » au regard des objectifs visés (paroi non isolée, non-conformité au référentiel, infiltrations très élevées, etc. voir [§2.7.3](#)), la moyenne

des besoins diminué à 40,4 kW.h_{ut}/m²/an. Cela signifie qu'il existe environ **10% de gain** de performance en accompagnant mieux les projets et en s'assurant du bon respect des référentiels visés. Plus encore, on note que **13 des 20 maisons ayant les besoins de chauffage les plus élevés** sont concernés par une ou deux contre-performances de l'enveloppe.

Si l'on développe l'analyse statistique, la Figure 122 ci-dessous présente les statistiques de besoin de chauffage mesuré selon ce critère de non-performance. En moyenne, **la présence de contre-performance fait augmenter le besoin de chauffage de 16 kW.h/m² soit +41%** par rapport à la valeur sans contre-performance. C'est donc une différence très importante.

De plus, l'échantillon des maisons sans contre-performance est **nettement moins dispersé dans les valeurs élevées** : la valeur Q3 de l'échantillon sans contre-performance est de 52 kW.h/m² (75% des maisons ont un besoin de chauffage inférieur à cette valeur) alors que pour les rénovations avec contre-performance il est de 73 kW.h/m².

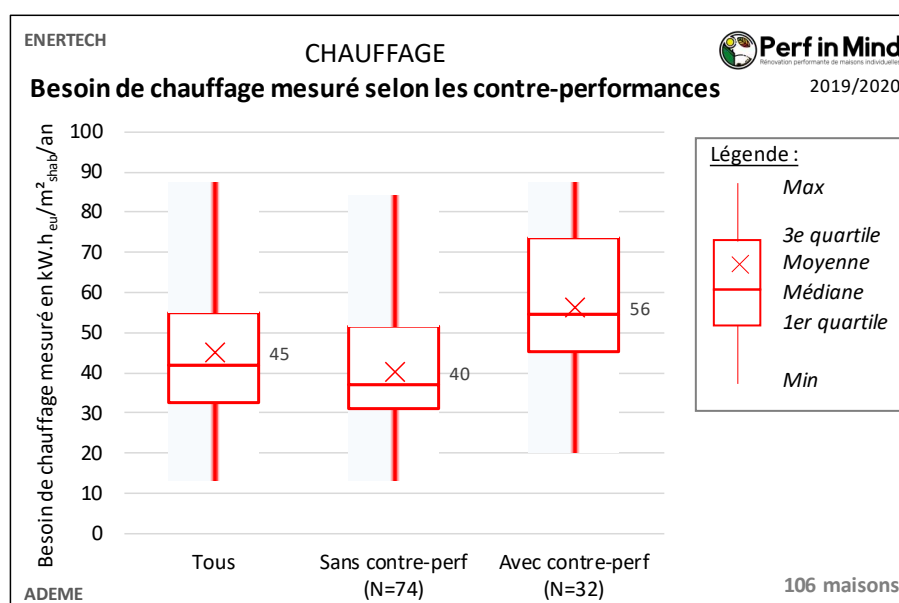


Figure 122 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) des besoins de chauffage mesurés, en identifiant les rénovations avec et sans contre-performance sur l'enveloppe.

On peut retenir que les rénovations sans contre-performance (ayant respecté le référentiel visé, ayant isolé toutes les parois ou au moins la périphérie du plancher bas, et ayant maîtrisé les infiltrations) sont **nettement plus performantes** (près de 16 kW.h/m² de moins en moyenne sur le besoin de chauffage) et leur performance est **plus fiable** (moins dispersée) que les maisons avec une ou plusieurs contre-performances sur l'enveloppe.

NB : on rappelle que nous n'avons indiqué ici que les contre-performances que nous avons pu identifier. Il est possible que d'autres contre-performances expliquent les consommations les plus élevées (notamment la valeur maximale de l'échantillon supposé sans contre-performance).

Les mêmes consommations utiles de chauffage rassemblées **par type d'objectif thermique** (rénovation basse consommation « BBC », Solution Technique de Référence « STR » ou énergie positive « E⁺ ») sont présentées en Figure 123 :

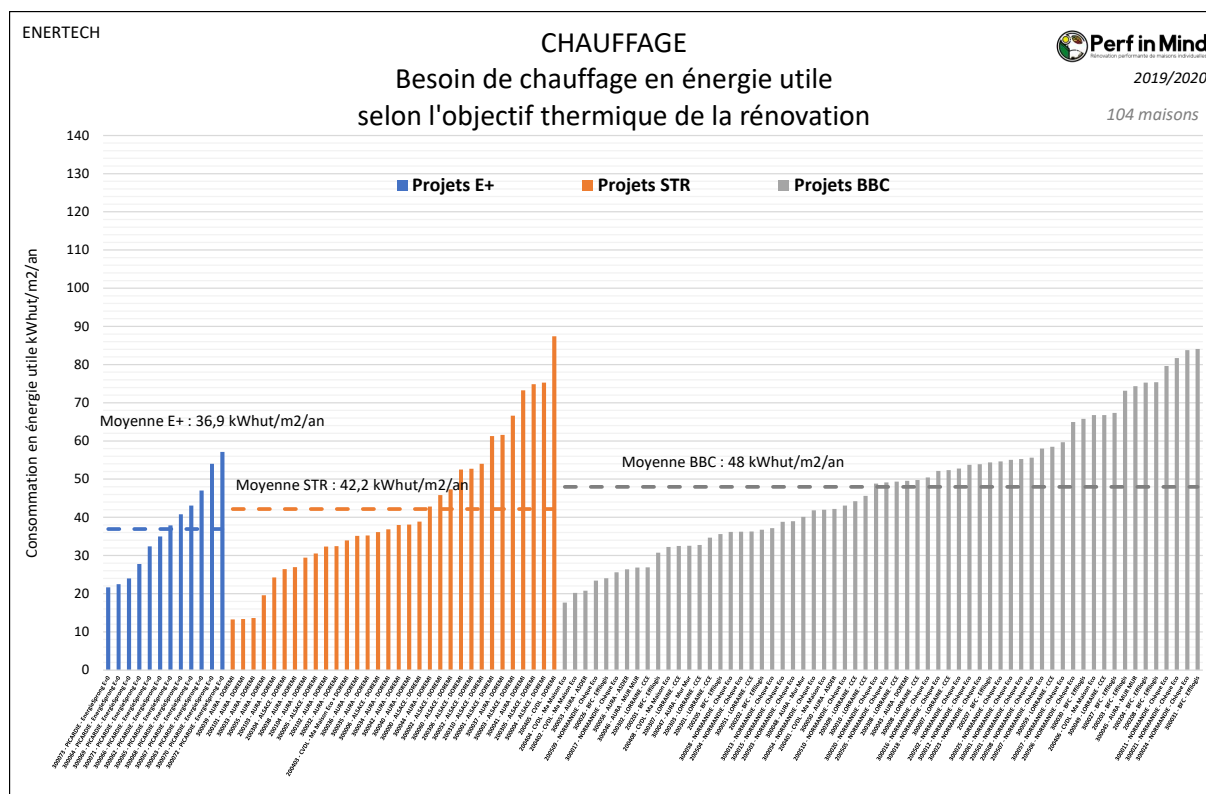


Figure 123 : Besoins de chauffage des logements tirés de la mesure, par type d'objectif thermique.

Les résultats sont les suivants :

- **BBC** (60 maisons) : moyenne 48 kW.h_{ut}/m²/an, variabilité de 1 à 5
- **STR** (32 maisons) : moyenne 42 kW.h_{ut}/m²/an, variabilité de 1 à 7
- **E+** (12 maisons) : moyenne 37 kW.h_{ut}/m²/an, variabilité de 1 à 3 (pour des maisons mitoyennes issues de la même opération !)

NB : il convient de rester prudent sur l'interprétation de ces données, notamment celles relatives à l'objectif E+ qui sont toutes issues du même projet de rénovation EnergieSprong à Longueau dans le nord de la France.

Les différences entre les moyennes atteintes dans chaque catégorie semblent relativement marginales en comparaison de l'étendue, pour le moins spectaculaire, des besoins min/max de chauffage dans chaque catégorie. Ce point est réabordé succinctement dans les paragraphes [4.2.1](#) et [4.2.3](#) et développé en détail dans l'approche calculatoire au [§4.3](#).

Quoi qu'il en soit **ces résultats nous semblent particulièrement positifs et attestent à notre sens de la solidité de la démarche de rénover de manière complète et performante.**

Nous allons voir que ces chiffres se confirment en énergie finale et primaire.

4.1.2 Chauffage en énergie finale

Le bilan de chauffage de l'ensemble de projets en énergie finale est fourni en Figure 124. L'énergie finale est intéressante dans la mesure où elle reflète la quantité d'énergie ou de combustible payée par l'utilisateur et à ce titre mentionnée sur ses factures.

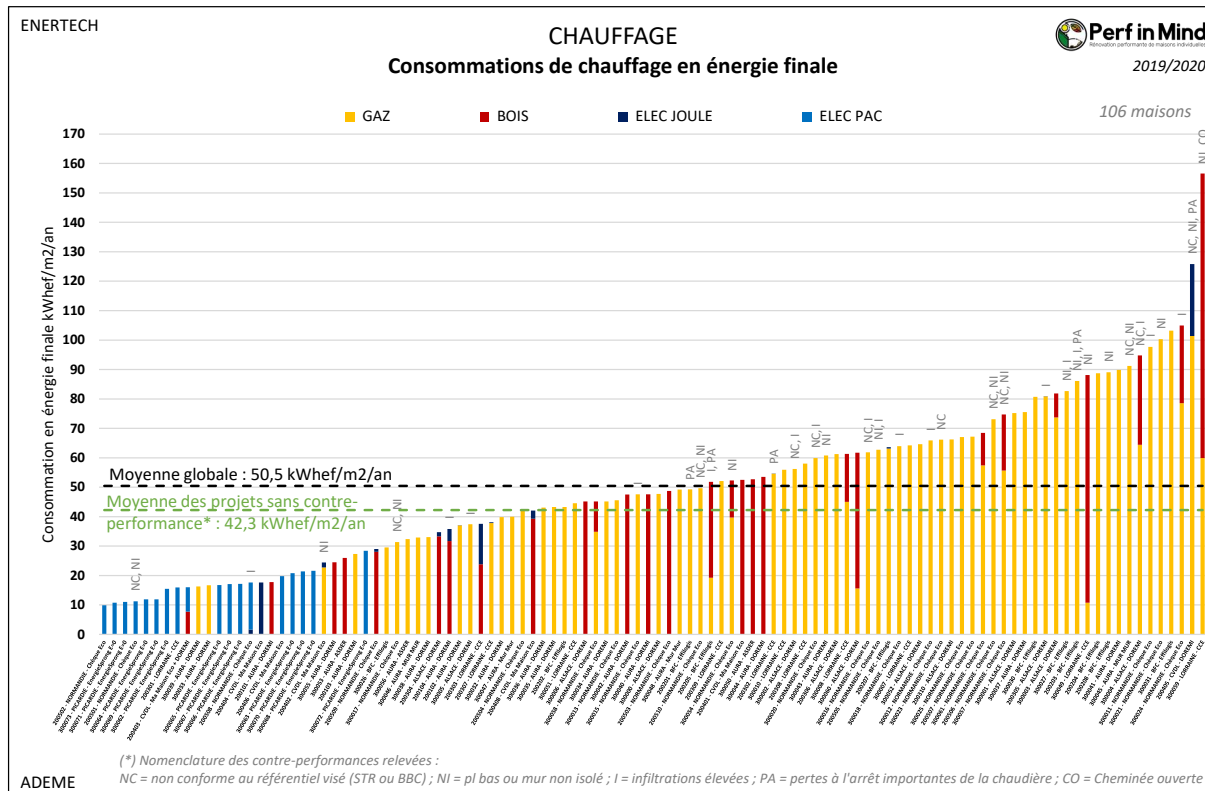


Figure 124 : Consommations de chauffage mesurées des projets en énergie finale.

Ces résultats nous indiquent :

- Que la consommation finale de chauffage des projets s'établit à 50,5 kW.h_{ef}/m²/an en moyenne globale ;
- Que l'étendue des consommations est encore plus spectaculaire que celle des besoins, avec une **variation de 1 à 16** (minimum 9,9 kW.h_{ef}/m²/an, maximum 156,6 kW.h_{ef}/m²/an) ;
- Qu'à peu près toutes les valeurs intermédiaires sont représentées, du moins jusqu'à 100 kW.h_{ef}/m²/an ;

Si l'on extrait les projets comportant des motifs de « **contre-performance** » au regard des objectifs visés, la moyenne des consommations chute à 42,3 kW.h_{ef}/m²/an. Le gain de performance à iso-périmètre grimpe donc à 15% (elle était de 10% en besoin de chauffage), principalement car on ajoute ici les contre-performances liées au maintien dans quelques projets des anciennes chaudières gaz qui présentent des pertes à l'arrêt considérables (voir §3.2.1 pour le recensement des chaudières conservées, et §4.2.5 pour l'analyse du rendement de ces chaudières).

Ce dernier point de l'extrême sensibilité du résultat final à un potentiel mauvais fonctionnement de la chaudière est un des enseignements forts de cette étude.

Compte tenu des montants engagés sur l'enveloppe, il nous semble que **la chaudière devrait faire l'objet d'un contrôle dans les phases de diagnostic ou d'état des lieux du projet**, si le propriétaire souhaite la conserver. Si ces pertes sont importantes mais rattrapables par un réglage et si le budget est trop serré, le maintien de la chaudière peut être discuté. Dans le cas contraire il faut absolument procéder au remplacement de ce générateur au risque d'annuler une bonne partie des bénéfices énergétique de l'isolation de l'enveloppe.

On notera que les deux tiers des projets les plus performants en énergie finale (consommation de chauffage $< 30 \text{ kW}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$) sont des projets comportant des pompes à chaleurs. Ce résultat n'est pas surprenant quand on sait que les quelques COP mesurés s'étendent de 2,2 (PAC air/eau sur radiateurs des 12 logements EnergieSprong) à 5,1 (PAC géothermie/eau sur plancher chauffant). On salue à ce titre les quelques projets qui se hissent à ce niveau de performance ($< 30 \text{ kW}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$) en génération gaz ou bois, signe d'une enveloppe très performante !

Il faut souligner toutefois que le bilan en énergie finale peut rapidement conduire à de mauvaises conclusions, comme par exemple celle de promouvoir des rénovations de mauvaise qualité sous prétexte que l'on écrase le résultat avec le COP d'une pompe à chaleur. En effet le résultat en énergie primaire permet une lecture tout à fait nouvelle des résultats (cf. paragraphe suivant).

4.1.3 Chauffage en énergie primaire

L'énergie primaire, dont l'objectif est de traduire physiquement la pression sur les ressources, se fait également un meilleur écho de la facture énergétique notamment sur la consommation d'électricité. Le bois bûche, considéré ici avec un coefficient primaire de 0,6 (cf. § [Méthodologie](#)), est également plus fidèle à la facture énergétique quand on le compare au gaz (coefficient de 1) et à l'électricité, compte tenu du coût effectivement bien plus faible de cette énergie (ce qui est moins vrai pour le granulé).

Le bilan de chauffage des rénovations en énergie primaire est fourni en Figure 125 ci-dessous.

On peut retenir les éléments suivants :

- **La consommation moyenne de chauffage des maisons en énergie primaire s'établit à 52,1 kW.h_{ep}/m²/an, ce qui constitue un résultat performant ;**
- L'étendue des consommations est encore spectaculaire une **variation de 1 à 15** (minimum 10,7 kW.h_{ep}/m²/an, maximum 164,4 kW.h_{ep}/m²/an) ;
- Toutes les consommations intermédiaires sont représentées entre 10 et 100 kW.h_{ep}/m²/an ;

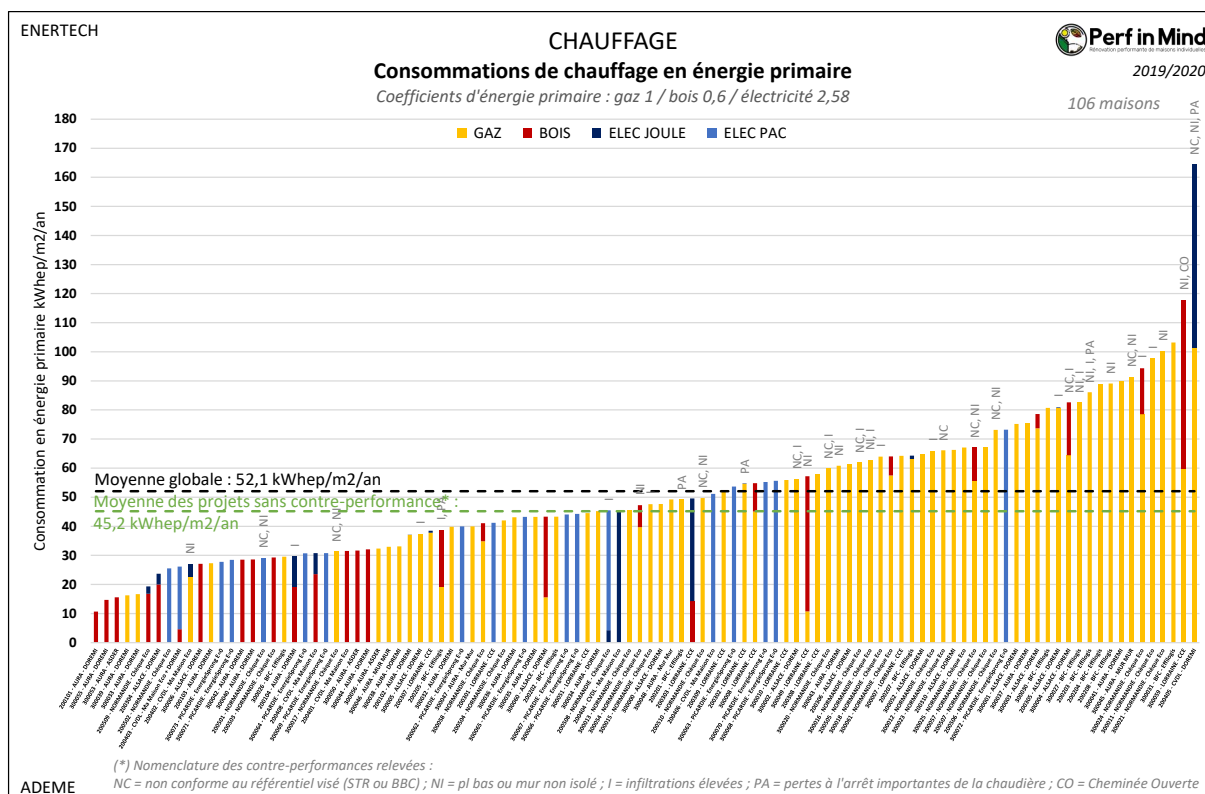


Figure 125 : Consommations de chauffage mesurées et traduites en énergie primaire.

Lorsque l'on extrait les projets comportant des motifs de « **contre-performance** » au regard des objectifs visés, la moyenne des consommations chute à 45,2 kW_h_{ep}/m²/an. La marge de performance que l'on dégage par un respect plus rigoureux des référentiels est donc d'environ 13%, à mi-chemin entre celles observées sur les consommations exprimées en énergie utile et finale.

Il est intéressant de constater ici que les 20 projets les plus performants sont bien plus équilibrés en termes d'approvisionnement énergétique que le classement en énergie finale : 25% de PAC, 50% de bois, 25% de gaz.

Les rénovations les plus performantes allient *a minima* et pour l'essentiel une excellente enveloppe et un bon rendement de d'exploitation de chauffage (PAC de COP supérieur à 3 ; rendement chaudière supérieur à 80%, etc.).

4.2 Paramètres influant sur la consommation

4.2.1 Pertes de l'enveloppe : Ubat et DJU

Le bilan thermique de tout bâtiment peut être représenté comme un équilibre entre les perdes de chaleur (perdes par les parois, infiltrations, ventilation) et les apports de chaleur (apports solaires, internes, fourniture de chauffage).

Cet équilibre n'est bien entendu pas vérifié à *tout instant* puisque de l'énergie peut être stockée dans la masse du bâtiment et que les températures ambiantes peuvent évoluer, néanmoins il constitue une approche très solide à l'échelle du mois ou de la saison de chauffe.



Tous les bâtiments que nous connaissons, anciens comme récents, présentent une **très large prépondérance des pertes par les parois**, devant les autres pertes.

Rappelons ici l'expression des pertes *normalisées* par les parois d'un bâtiment sur une saison de chauffe, qui est tout simplement la conductivité des parois multipliée par la surface de ces dernières, le tout multiplié par la « rigueur » de l'hiver exprimée par les DJU :

$$\text{Pertes_parois (Wh)} = \text{UBAT (W/m}^2_{\text{parois/K)}} \times \text{Compacité (m}^2_{\text{parois/m}^2_{\text{shab}}}) \times \text{DJU (K.h)}$$

Si l'on appelle « UBATshab » le produit UBAT x Compacité, on a tout simplement :

$\text{Pertes_parois} = \text{UBATshab} \times \text{DJU}$

NB : cette « perte paroi » est bien sûr purement théorique dans la mesure où elle ne prend pas en compte le comportement de l'usager à travers le réglage de la température ambiante du logement ou l'ouverture des fenêtres.

On s'intéresse donc dans un premier temps à ces deux termes (UBATshab et DJU) sur l'ensemble des projets étudiés, compte tenu de la connaissance détaillée de leur enveloppe (rénovée) et de leur situation géographique.

Le résultat, adimensionné (c'est-à-dire rapporté à la valeur moyenne de l'échantillon), est présenté en Figure 126.

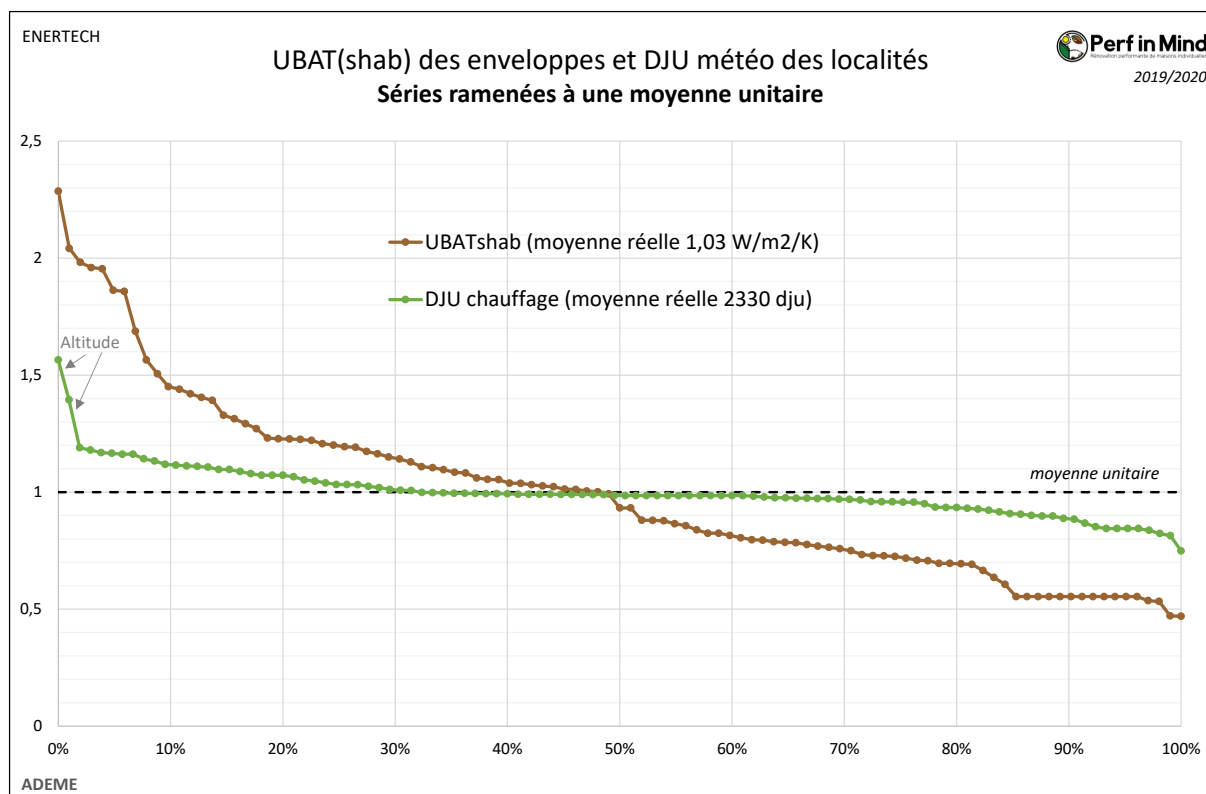


Figure 126 : Valeurs relatives des UBATshab et DJU rencontrées sur l'ensemble des projets.

Ce graphique nous montre une tendance fondamentale qu'il est important de garder en tête dans la suite de l'analyse : **la plage de variation que l'on observe sur la qualité thermique des enveloppes est très supérieure à celle que l'on observe sur la rigueur des hivers d'un endroit à l'autre** (hors altitudes significatives).

En effet on constate que les DJU des projets analysés, hormis les deux maisons en altitude, évoluent dans une étendue de 1 à 1,6 pendant que les UBATshab s'étendent de 1 à presque 5.

Cela signifie que la perte thermique par les parois d'un logement doit être vue avant tout comme une problématique intrinsèque au logement (pour « 75% ») et dans une moindre mesure comme une problématique de localisation via les DJU (pour « 25% ») : en un mot une enveloppe performante « écrase » pour une grande partie les variations observées entre les différentes zones climatiques.

On notera également que les compacités rencontrées dans notre échantillon varient dans une étendue deux fois moins importante (1,78 à 3,81 m²_{parois}/m²_{shab}) que celle des UBAT (0,22 à 0,86 W/m²_{parois}/K). Une mauvaise compacité constitue donc un handicap de départ mais peut être rattrapé de manière significative avec un bon UBAT, c'est-à-dire de bonnes résistances thermiques.

4.2.2 Corrélation entre la consommation finale de chauffage et la perte théorique de l'enveloppe.

Puisque les pertes par les parois constituent la plus grande partie des pertes thermiques d'un logement, il est intéressant de tenter de corréler les consommations de chauffage en énergie finale (la plus directement accessible) avec la perte théorique par les parois « UBATshab x DJU ». Le résultat est présenté en Figure 127.

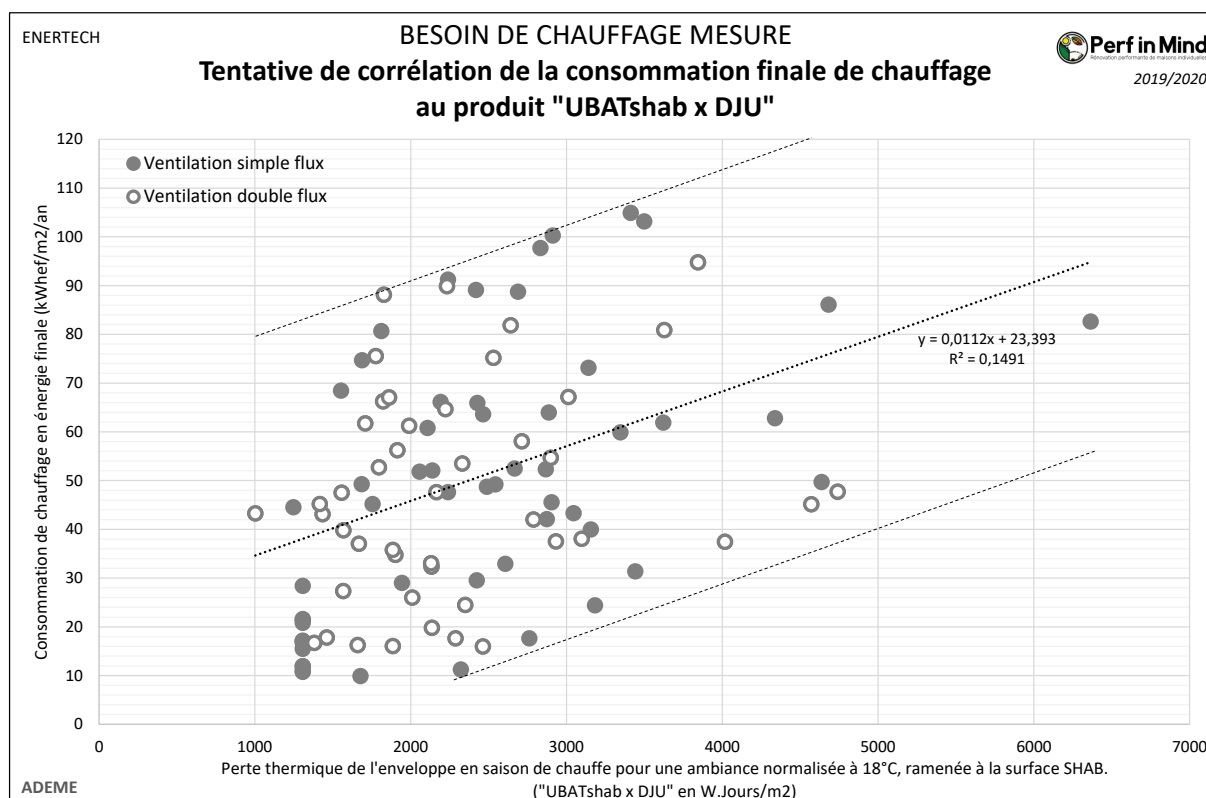


Figure 127 : Corrélation entre la consommation de chauffage mesurée et la perte thermique « théorique » de l'enveloppe.

La corrélation est « malheureusement » très faible, avec des variations de consommation de 1 à 4 voire même 1 à 9 pour les faibles pertes d'enveloppe.

On pourrait penser que cette mauvaise corrélation provient en partie des rendements et facteurs d'efficacité des productions de chaleur. On peut donc tenter de visualiser une corrélation entre besoin utile de chauffage et pertes de l'enveloppe (paragraphe suivant).

4.2.3 Corrélation entre le besoin de chauffage utile et la perte théorique de l'enveloppe

La corrélation entre les besoins utiles de chauffage (déduits de la mesure) et les pertes théoriques de l'enveloppe est présentée en Figure 128.

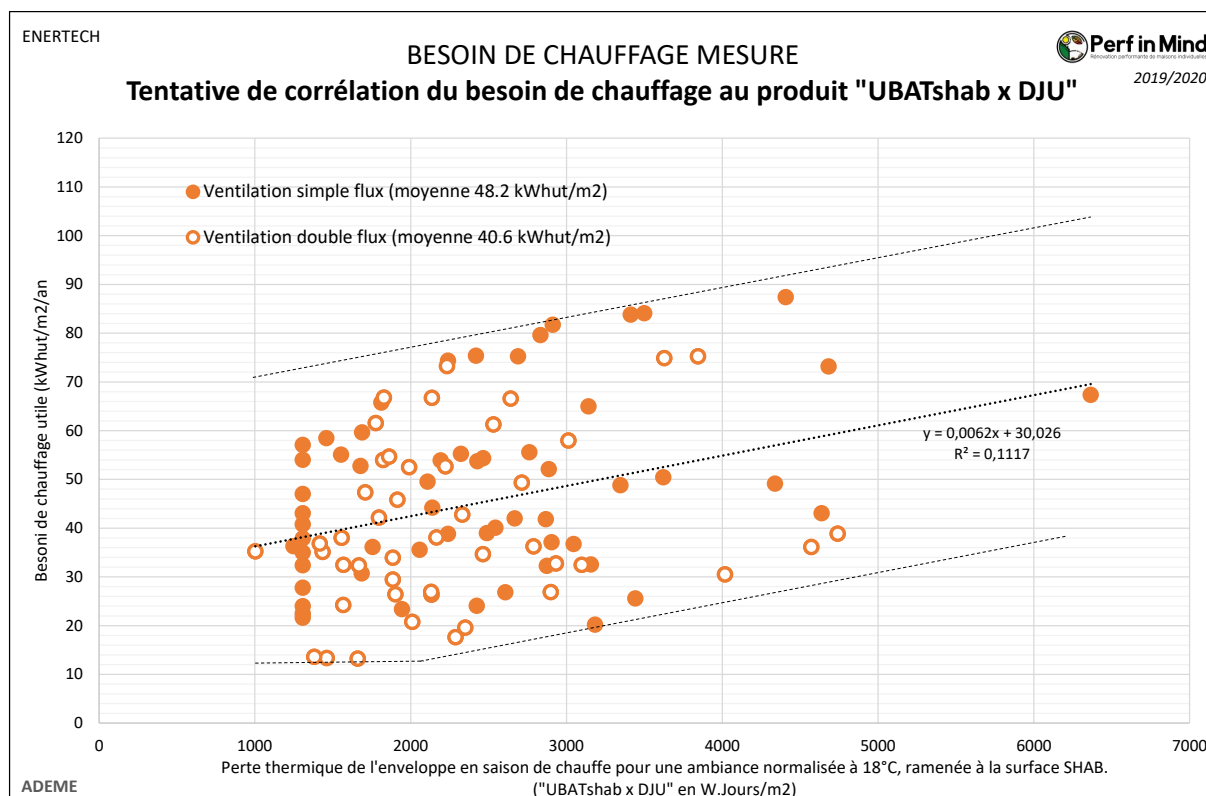


Figure 128 : Corrélation entre les besoins de chauffage mesurés et les pertes thermiques « théoriques » des enveloppes.

Le nuage de point est légèrement moins dispersé qu'en énergie finale comme on s'y attendait mais la corrélation n'est toujours pas satisfaisante.

La variation de besoin de chauffage à iso-perte théorique des parois s'étend cette fois de 1 à 3 voire 1 à 6 pour les faibles pertes d'enveloppe.

Cette dispersion toujours forte s'explique selon nous majoritairement par les deux points suivants :

- **Dispersion des températures ambiantes** (en moyenne et en profil) d'un logement à l'autre ;
- Mais surtout **part très variable des apports solaires et internes d'un logement à l'autre**, dans des logements performants où ces apports sont du même ordre de grandeur que l'apport de chauffage.

On ne peut donc pas associer *de manière précise* un besoin de chauffage à un UBAT et une zone climatique. La modélisation des températures ambiantes et des apports « gratuits » est incontournable. C'est ce que démontre l'approche calculatoire présentée dans le [§4.3](#).

4.2.4 Ventilation – efficacité mesurée de l'échangeur en double flux

Plusieurs paramètres de la ventilation impactent le besoin de chauffage :

- Les débits réels de ventilation ont été mesurés sur les 38 maisons en suivi avancé. Les résultats ont été présentés au §3.1.3.
- Pour 13 suivi « avancés » en ventilation double flux (sur 18), nous avons pu également calculer l'efficacité de l'échangeur, et les résultats sont présentés dans ce paragraphe.

Le principal avantage de la ventilation double flux est de récupérer la chaleur intérieure en hiver avant son rejet et de l'injecter sur l'air soufflé. Nous calculerons ici l'efficacité de l'échangeur en température et en énergie.

NB : l'échangeur permet également la récupération de fraîcheur en été, mais ce gain n'a pas été suivi ici.

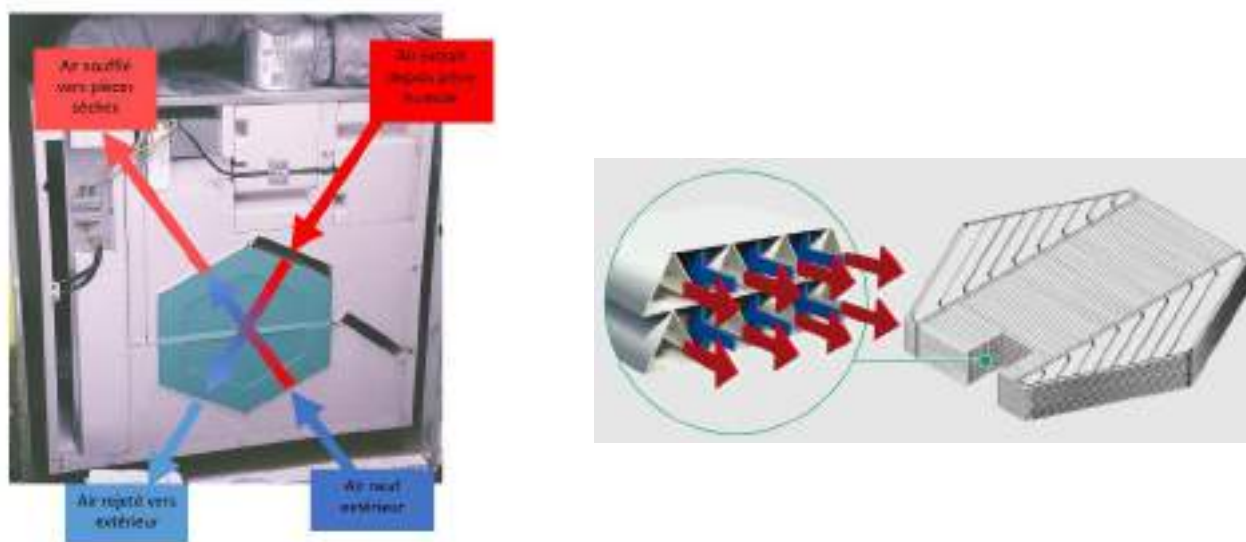


Figure 129 : Principe de récupération de chaleur de l'échangeur

L'efficacité en température peut se calculer à l'aide des capteurs de température installés au niveau des caissons. La formule utilisée est la suivante

$$Efficacité = \frac{T^{\circ}C \text{ Air Extrait} - T^{\circ}C \text{ Air Rejeté}}{T^{\circ}C \text{ Air Etrait} - T^{\circ}C \text{ Air Neuf}}$$

Cependant cette formule n'est valable que lorsque les débits sont égaux. Un déséquilibre des débits nuit à l'efficacité puisque cela revient à avoir une ventilation double flux avec les débits équilibrés (correspondant au plus petit des débits) et une ventilation simple flux (correspondant à la différence entre les deux débits).

La Figure 130 permet d'observer qu'en moyenne les débits de soufflage est de 107 m³/h et celui d'extraction de 125 m³/h.

Certains logements ont un fort déséquilibre de débit par exemple le logement 200507 avec 149 m³/h pour l'extraction et 70 pour le soufflage. A contrario le logement 200304 présente un débit de d'extraction de 42 m³/h pour 106 m³/h soufflé.

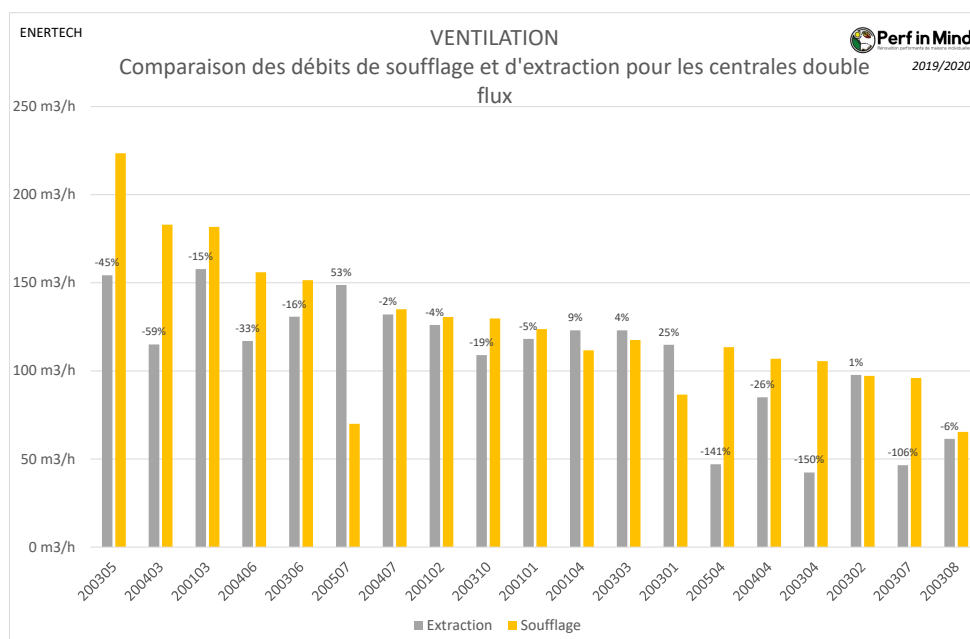


Figure 130 : Ventilation : Comparaison des débits de soufflage et d'extraction pour les centrales double flux

Afin de calculer l'efficacité énergétique de récupération la formule suivante a donc été utilisée :

$$\text{Efficacité récupération énergie en tenant compte des débit} = \text{Efficacité température} \times \frac{\text{Débit de soufflage}}{\text{Max (Débit de soufflage ; Débit d'extraction)}}$$

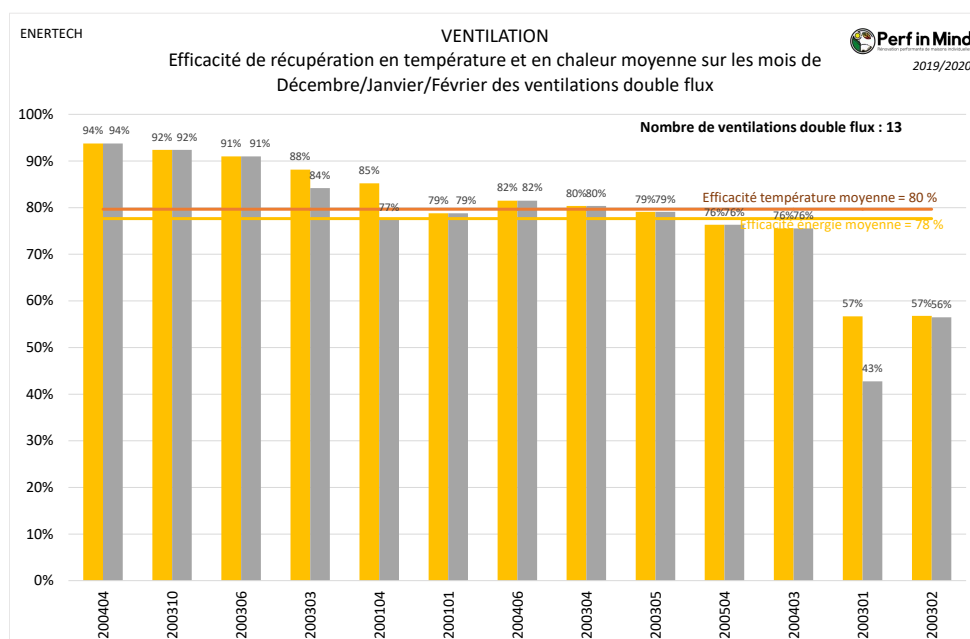


Figure 131 : Ventilation – Efficacité de récupération en température et en chaleur sur les mois de décembre/janvier/Février.

L'efficacité en température est de 80% en moyenne et celle en énergie de 78%. L'écart est faible et montre deux phénomènes :

- Dans 9 cas sur 13 c'est le débit de soufflage qui est supérieur au débit d'extraction. C'est donc l'efficacité en température qui pâtit du déséquilibre de débit. En effet, dans ce cas l'échangeur récupère la totalité de ce qu'il peut. Mais le débit de soufflage étant supérieur au débit d'extraction il ne peut pas récupérer de l'énergie non extraite. Par exemple, le logement 504 possède un débit de soufflage de 113 m³/h pour un débit d'extraction de 47 m³/h. Son efficacité en température est de 76% alors qu'en théorie elle aurait dû être de 90% (données constructeur)
- Pour les logements dont le débit d'extraction est supérieur au débit de soufflage, la perte d'efficacité va jusqu'à 14%

Le déséquilibre de débit joue donc sur l'efficacité, il faut donc veiller au bon équilibrage des débits. Mais l'impact reste cependant assez limité.

On note également l'efficacité limitée de l'échangeur « fait maison » du logement 200302 (dernier barreau du graphique).

4.2.5 Fonctionnement des systèmes de chauffage

Comme nous l'avons vu au [§3.2.3](#), les logements équipés de chaudières gaz ou à granulés disposent d'un ou plusieurs organes de régulation.

Nous nous intéressons ici à l'évaluation du fonctionnement de ces systèmes de régulation par la mesure.

❖ Fonctionnement de la régulation terminale

Sur certains logements équipés de thermostats d'ambiance, la régulation semble marcher parfaitement. Le graphique ci-dessous montre sur une période d'une semaine la température dans le séjour (courbe en gris, échelle de droite), ainsi que la puissance mesurée au compte de chaleur sur le circuit de chauffage (en orange, échelle de gauche). La température extérieure est en bleu (échelle de droite) :

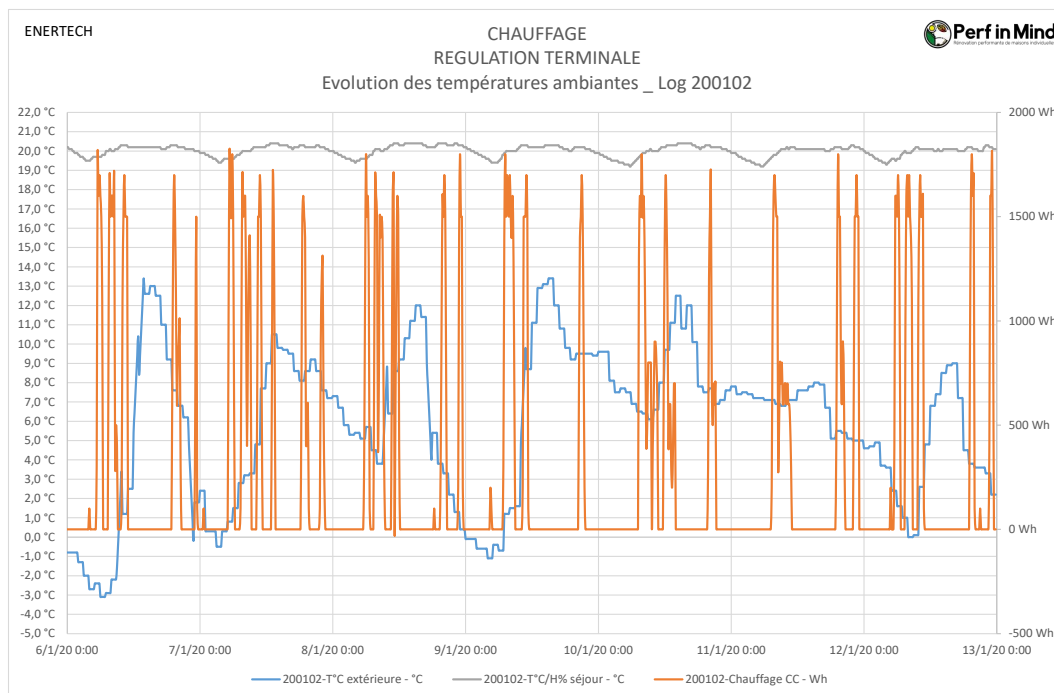


Figure 132 : Graphique d'analyse de la régulation terminale : bon fonctionnement (thermostat).

On observe que la chaudière est coupée la nuit et effectue une relance le matin. Ensuite la chaudière reste en fonctionnement tant que la température du séjour reste en dessous d'une consigne d'environ 20°C. Elle s'éteint lorsque cette température dépasse 20°C, et se rallume ponctuellement lorsque la température descend.

A l'inverse, certaines régulations terminales ne fonctionnent pas de façon optimale. Sur la Figure 133 ci-dessous, on voit la température du séjour (courbe en rouge, échelle de droite) qui oscille fortement et de façon irrégulière. Les appels de puissance (courbe orange, échelle de gauche) sont permanents, même si la température intérieure atteint 24°C.

A priori cette séquence de mesure indique soit un mauvais câblage du thermostat, soit un thermostat réglé à une consigne trop élevée. Seuls les robinets thermostatiques (présents dans cette maison) effectuent la régulation terminale, dont on constate la mauvaise précision.

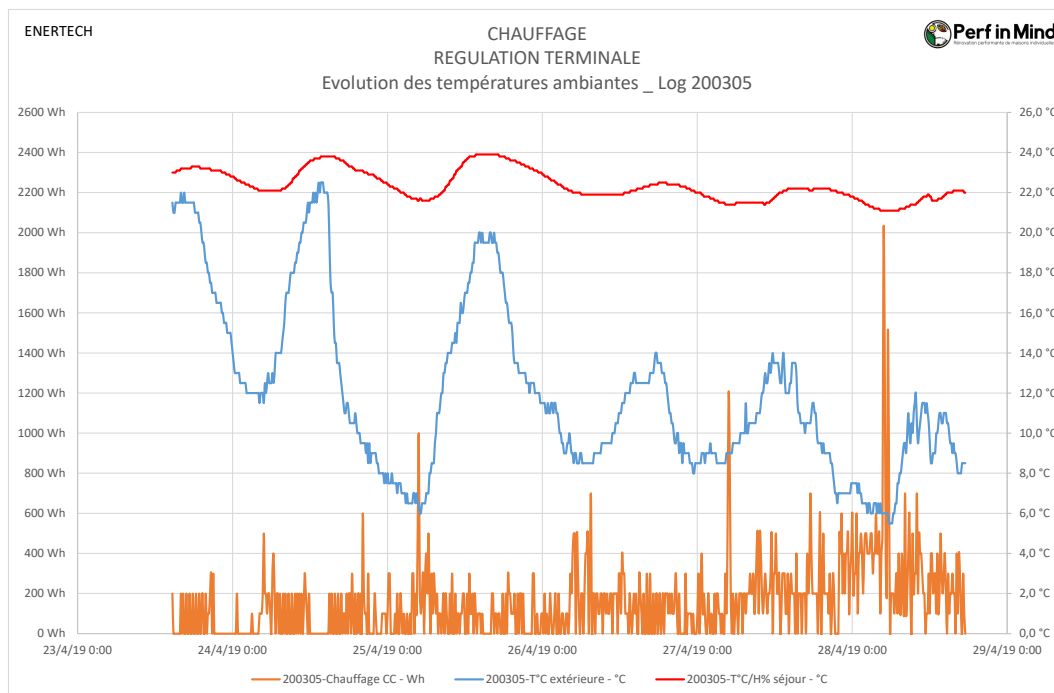


Figure 133 : Graphique d'analyse de la régulation terminale : mauvaise régulation malgré la présence d'un thermostat.

Une autre façon de visualiser l'effet de la régulation terminale est de tracer les appels de puissance en fonction de la température ambiante. On peut ainsi voir si les appels de puissance n'ont lieu qu'autour d'une température donnée (la consigne), ou si au contraire des appels de puissance sont constatés quelle que soit la température intérieure :

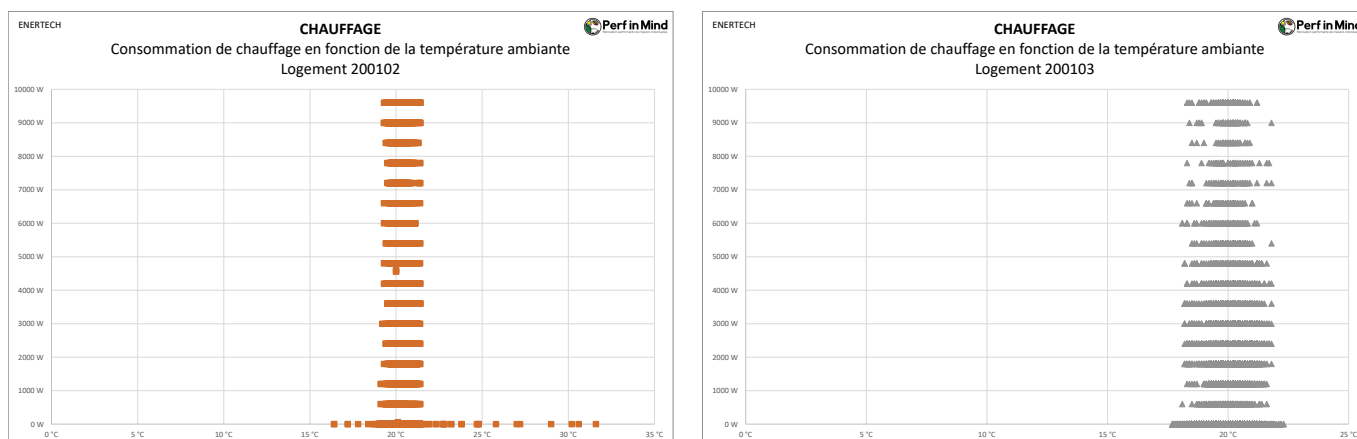


Figure 134 : Graphique d'analyse de la régulation terminale : puissance appelée en fonction de la température intérieure : cas de 2 maisons où la régulation terminale a bien fonctionné.

Sur la Figure 134 ci-dessus, on voit pour 2 logements des appels de puissances centrés sur une consigne de température de 20°C environ.

A contrario, pour les 2 logements de la Figure 135 suivante, le chauffage a continué de fonctionner jusqu'à des températures dépassant 24°C voire 26°C, ce qui dénote une régulation terminale peu performante, et ce malgré la présence d'un thermostat d'ambiance. Ceci semble provenir soit un mauvais câblage du thermostat soit le réglage d'une consignée trop élevée. Les robinets thermostatiques, présents également, ne permettent pas de réguler efficacement.

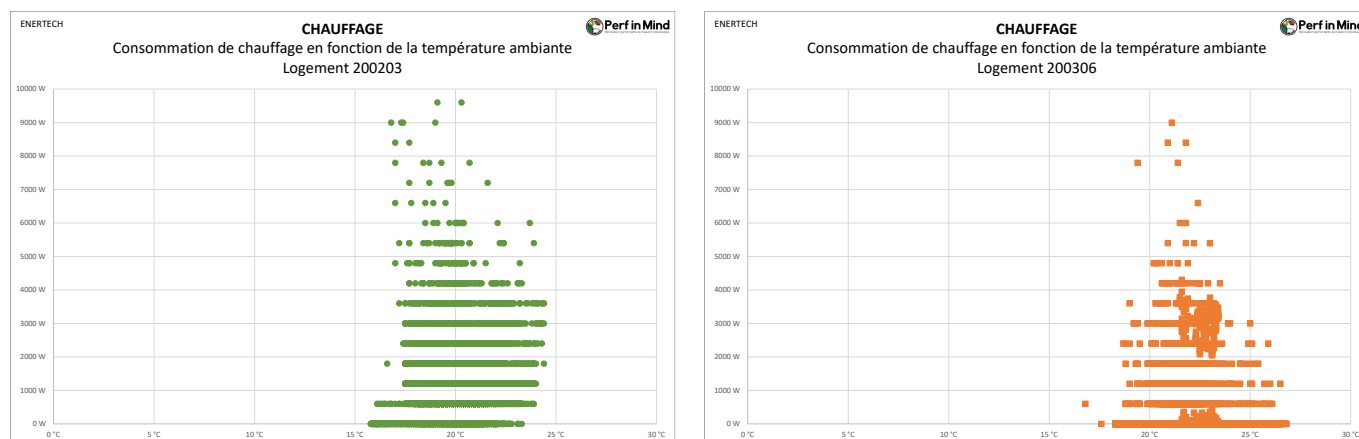


Figure 135 : Graphique d'analyse de la régulation terminale : puissance appelée en fonction de la température intérieure : cas de 2 maisons où la régulation terminale n'a pas bien fonctionné.

Ces observations rappellent **l'importance de la régulation terminale**. Comme nous le verrons au [§4.3](#), l'impact d'un degré de plus dans ces maisons rénovées à un niveau performant se traduit par une augmentation de la consommation de chauffage de +17%. Il est donc très important d'avoir une régulation précise pour assurer le confort sans faire dérafer la facture. Les robinets thermostatiques ne suffisant plus à réguler précisément les bâtiments performants, l'ajout d'un **thermostat nous semble une bonne pratique à généraliser**.

Concernant les poêles à bûches, qui ne peuvent pas être équipés de thermostats, nous verrons au [§8.1.4](#) que la variation de température dans la journée est relativement maîtrisée. Voir en particulier la [Figure 202](#). Ce type d'émission, moins bien régulée mais très simple et peu coûteuse, n'est pas à exclure de la rénovation performante.

❖ Programmation horaire

La Figure 136 présente les courbes de charges moyenne journalières des consommations de chauffage entre le 10/12/2019 et le 01/03/2020 pour 4 logements équipés de chaudière gaz asservie à une programmation horaire.

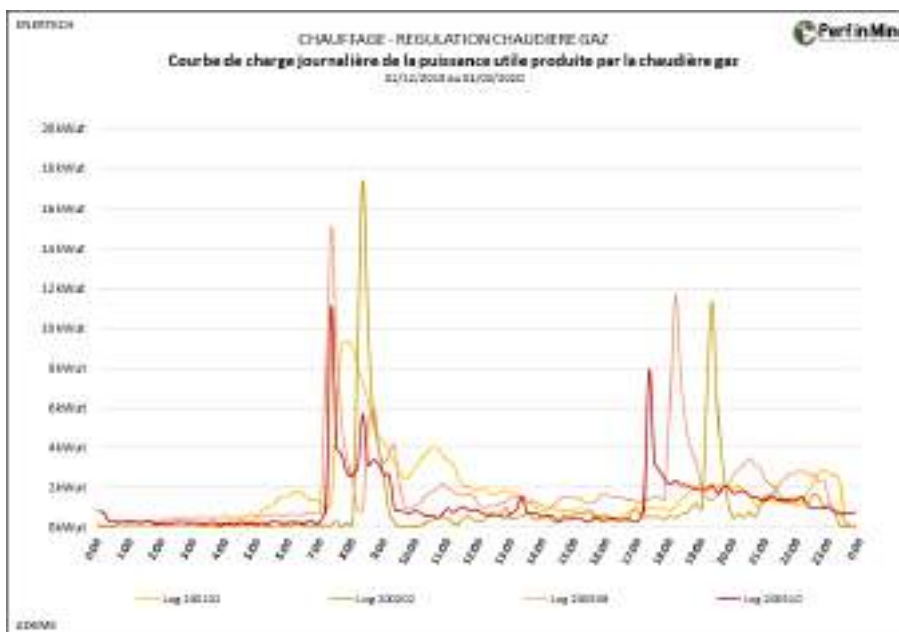


Figure 136 : Courbe de charge journalière de la consommation avec programmation horaire.

La Figure 137 présente les courbes de charges moyenne journalières des consommations de chauffage sur la même période pour 4 logements équipés de chaudière gaz ne disposant pas de programmation horaire.



Figure 137 : Courbe de charge journalière de la consommation sans programmation horaire.

Ces deux graphiques permettent de voir que la programmation horaire semble fonctionner. Son effet est de concentrer les appels de puissance au moment de la relance matinale et également en soirée.

L'effet en termes d'appels de puissance sur les mêmes logements est visible sur les courbes de fréquences cumulées des puissances appelées suivantes :

La Figure 138 présente les monotones des puissances appelées par 4 logements équipés de chaudières gaz asservie à une programmation horaire, et la Figure 139 présente les mêmes résultats pour les 4 logements équipés de chaudières sans programmation horaire.

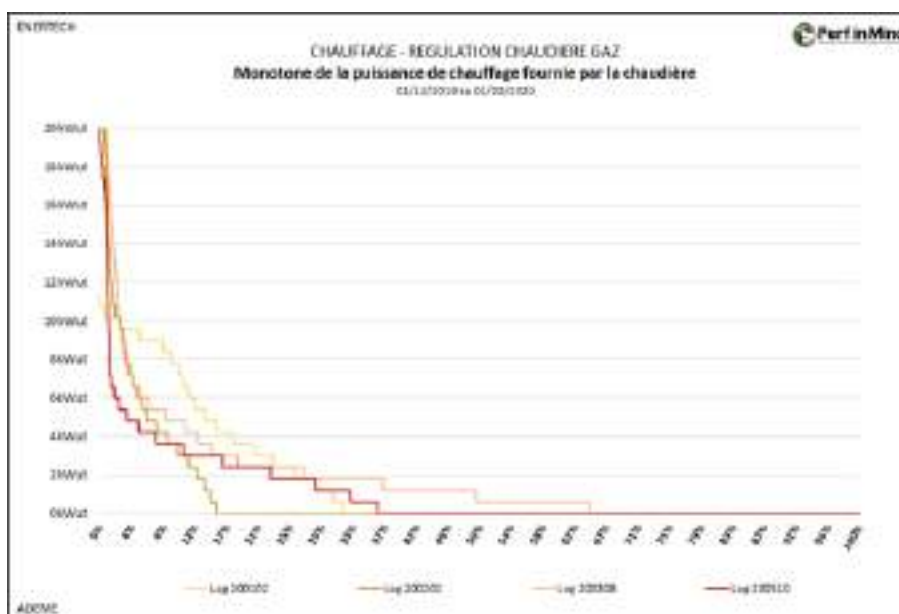


Figure 138 : Monotone de la puissance fournie avec programmation horaire.

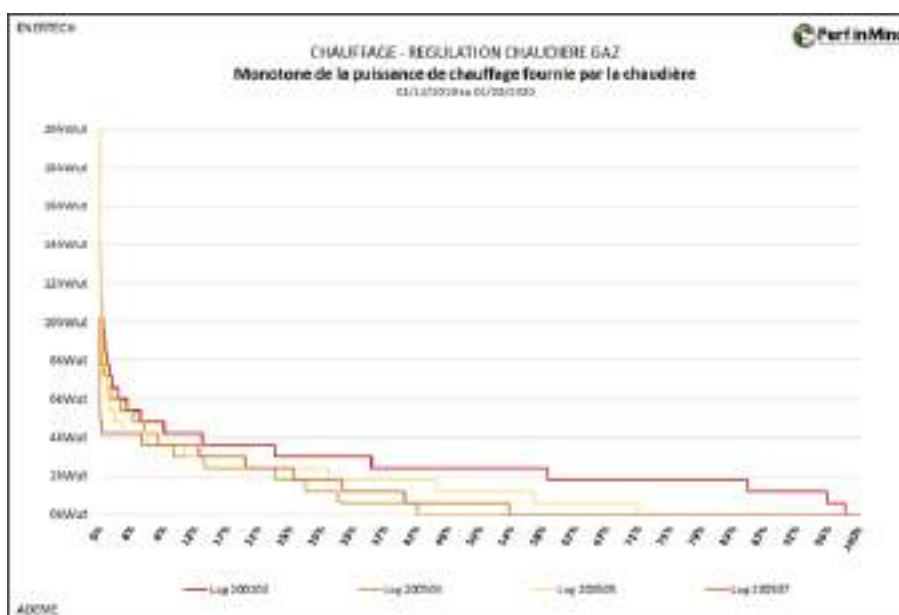


Figure 139 : Monotone de la puissance fournie sans programmation horaire.

On observe que la présence d'une programmation horaire a pour effet de concentrer les appels de puissance sur des puissances plus importantes pendant des périodes plus courtes. Une part plus importante du temps est passée avec la chaudière totalement à l'arrêt, ce qui se produit moins fréquemment sans programmation horaire.

NB : dans le questionnaire, le ménage du logement 200203 a répondu disposer d'un thermostat d'ambiance sur lequel est programmé un réduit de nuit. Pourtant nous l'avons classé ici dans la catégorie des logements sans programmation horaire. Ceci a attiré notre attention.

Sur site nous avons pu constater sur le thermostat d'ambiance le réglage suivant :

- Confort : 7h-9h / 12h-14h / 17h-23h => consigne de 20°C
- Réduit : 23h-7h / 9h-12h / 14h-17h => consigne de 17°C

Cependant, les mesures de la température de départ chauffage et le compteur de calories ne montrent pas de changement au fil de la journée (voir Figure 137, courbe rouge). Il semble donc que le **thermostat d'ambiance n'a en réalité pas d'autorité sur la chaudière**. Le thermostat a bien été installé et programmé, mais le raccordement à la chaudière n'a pas dû être effectué correctement.

❖ Sonde de température extérieure et loi d'eau

Comme nous l'avons vu au §3.2.3, 55% des logements équipé d'une chaudière gaz régulent celle-ci par une loi d'eau. L'objectif de cette régulation est de réduire la puissance émise par les émetteurs (généralement les radiateurs) en mi-saison. Une sonde de température extérieure donne l'information à un régulateur, qui agit sur la chaudière pour abaisser la température de l'eau. Ainsi au plus froid de l'hiver on envoie de l'eau chaude aux radiateurs, pour chauffer à pleine puissance, et en mi-saison on envoie de l'eau tiède aux radiateurs, pour n'envoyer que la puissance nécessaire.

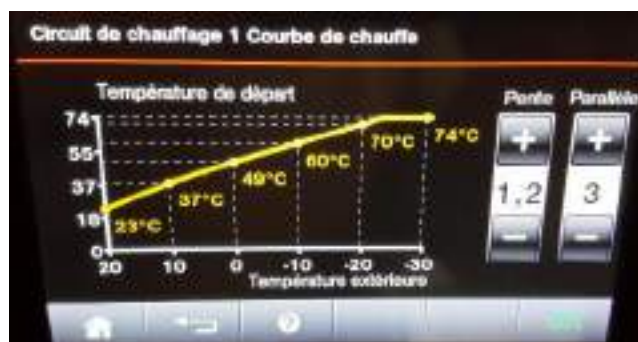


Figure 140 : Illustration : exemple de programmation de la loi d'eau sur une chaudière.

Ce système permet de mieux réguler le chauffage, ce qui améliore le confort, et également de faire revenir de l'eau plus froide à la chaudière, ce qui lui permet de mieux condenser les fumées, ce qui améliore le rendement.

La mesure des températures de départ de la chaudière, comparée à la température extérieure, permet de vérifier si cette loi d'eau a bien fonctionné.

La Figure 141 ci-dessous montre que l'on retrouve bien par la mesure les lois d'eau programmées sur les chaudières suivies.

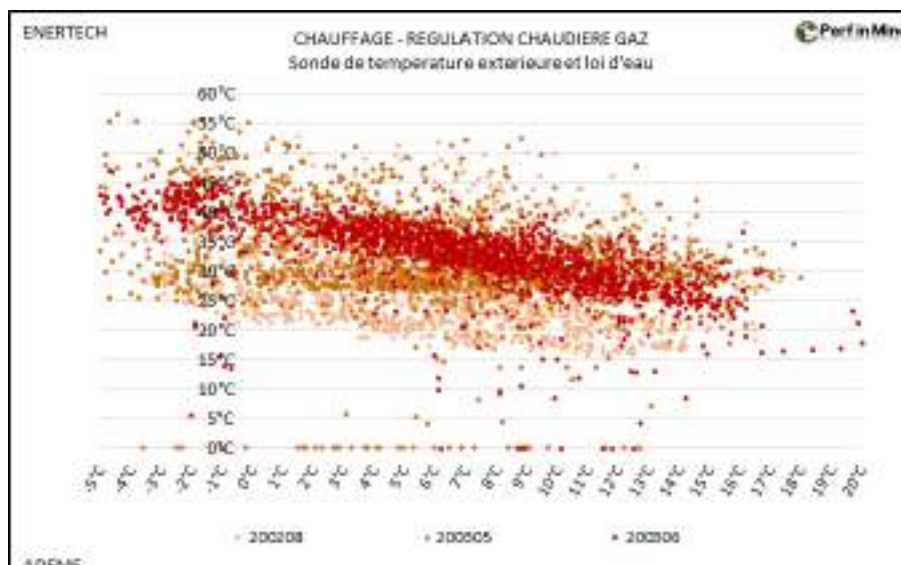


Figure 141 : Graphique des températures de départ chauffage (verticalement) en fonction de la température extérieure (horizontalement) pour des chaudières avec loi d'eau.

Inversement, pour des maisons où aucune loi d'eau n'a été programmée, notamment en l'absence d'une sonde de température extérieure, ou en présence d'un aquastat, la Figure 142 ci-dessous montre que la température de départ n'est pas modifiée en fonction de la température extérieure. La température de départ est régulée de façon constante lorsque la chaudière est allumée, et redescend progressivement à l'arrêt.

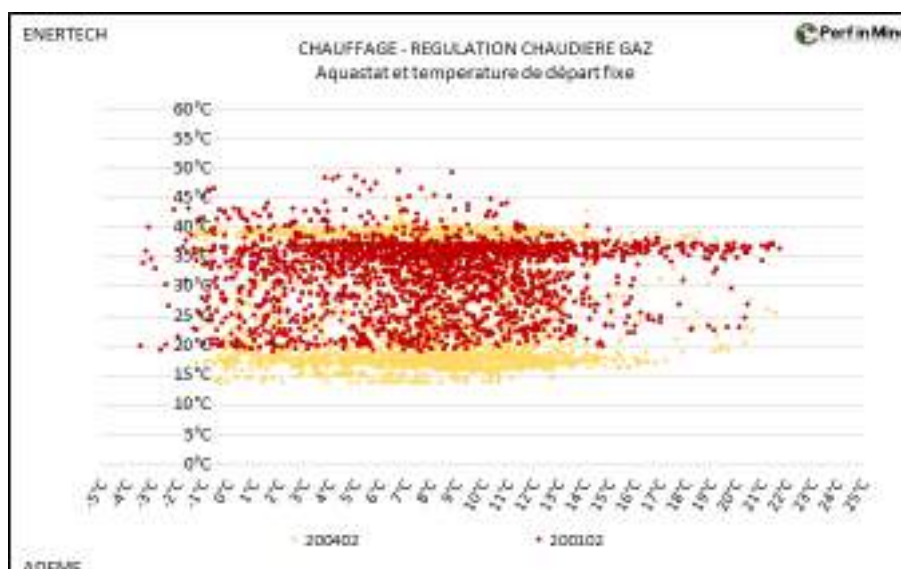


Figure 142 : Graphique des températures de départ chauffage (verticalement) en fonction de la température extérieure (horizontalement) pour des chaudières dépourvues de loi d'eau.

❖ Etude des températures de départ/retour chauffage

Le suivi des régimes de température est important notamment car la température de retour à la chaudière détermine sa capacité à condenser ou pas. En effet, une chaudière à condensation dont l'eau revient à plus de 55°C ne peut pas condenser. Il faut un retour assez froid pour que l'eau contenue dans les fumées puisse condenser sur le corps de chauffe. Ainsi le rendement de la chaudière est directement lié à la température de retour.

Sauf de manière très ponctuelle, **le point de rosée permettant une bonne condensation est atteint** sur l'ensemble des chaudières gaz observées, au moins en moyenne :

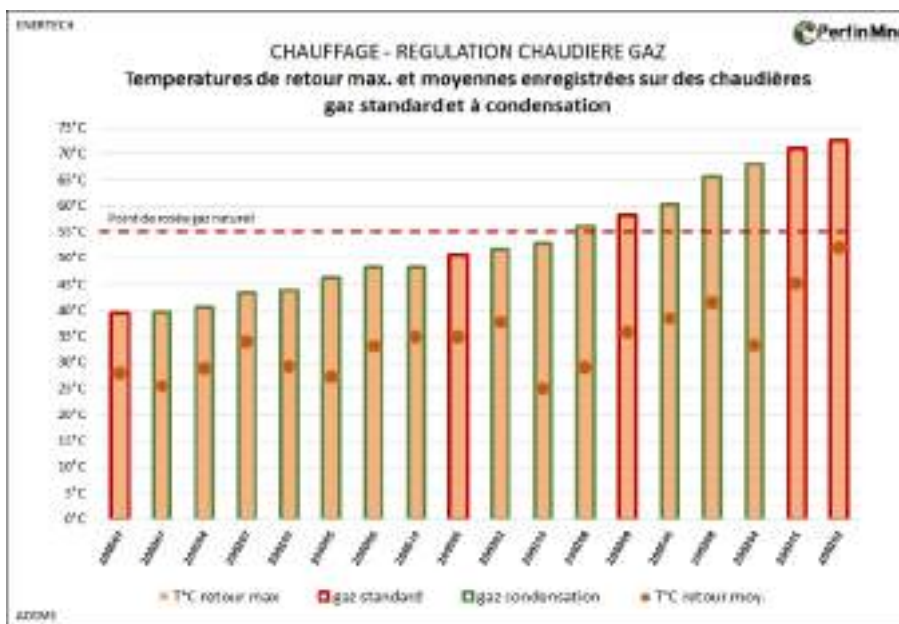


Figure 143 : Niveaux de températures retour et de de condensation des fumées (point de rosée).

Nous nous interrogeons cependant sur les température maximales atteintes, qui semblent indiquer des régimes de température de type 80/60 (retour à 60°C et plus). Ces régimes sont courants dans le bâtiment ancien avant rénovation. Cependant, après rénovation il est nécessaire de reprogrammer le régime de température pour adapter la puissance des émetteurs à la maison isolée. Sans cela la puissance émise reste très importante et peut conduire à des surchauffes récurrentes. Dans le cadre d'une rénovation performante on peut généralement descendre autour d'un régime 55/40 (retour à 40°C environ au plus froid de l'hiver), ce qui semble le cas des logements à gauche du graphique.

La loi d'eau d'avant la rénovation semble avoir été conservée sur plusieurs des logements mesurés (à droite du graphique). **Le réglage de la nouvelle loi d'eau après rénovation semble ne pas avoir été effectué dans ces logements.**

Ce constat nous invite à insister sur l'importance de **prévoir une sonde de température pour permettre la loi d'eau** et l'importance du **réglage des installations de chauffage après rénovation**, qui restent indispensables pour maximiser le confort et les économies d'énergies.

❖ Rendement des chaudières GAZ

Pour 20 logements équipés de chaudière gaz double service (qui font le chauffage et l'eau chaude sanitaire) chez qui nous avons disposés de compteurs de chaleurs, nous avons pu déterminer les **rendements de génération** pour le chauffage et la production d'ECS.

En moyenne, le rendement des chaudières gaz double service est de 78%. Si on sépare les usages, il s'élève à 82% pour le chauffage et descend à 72% pour la production d'ECS.

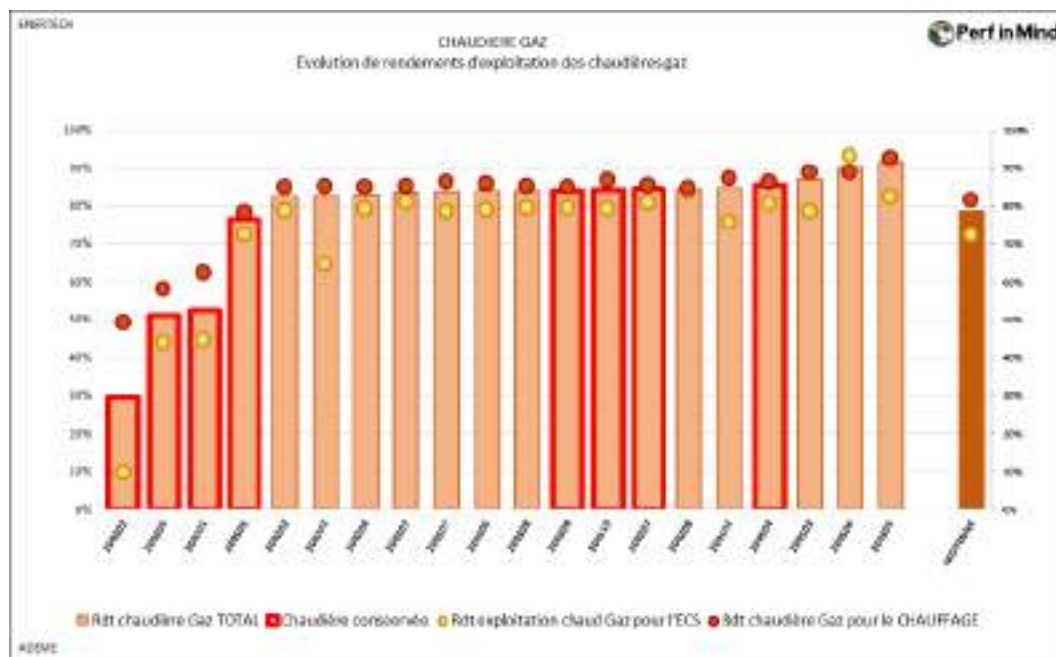


Figure 144 : histogramme des rendements de génération des chaudières gaz

Parmi les 20 chaudières suivies, 8 sont des **chaudières conservées** d'avant la rénovation. Sur ces 8 chaudières conservées, 4 sont celles dont les rendements sont les moins bons de tout le panel. Les 4 autres chaudières conservées ont quant à elles des rendements du même niveau que celles des chaudières remplacées.



Figure 145 : photo des chaudières gaz conservées et présentant de faibles rendements. Celle de gauche est de 1998, l'année des deux autres n'est pas connue.

L'analyse détaillée des installations concernées montre que pour les 2 chaudières présentant les rendements les plus mauvais (logement 200302 et 200205) ne présentent pas de veilleuse mais leur corps

de chauffe est maintenu en température pour la production ECS, même en l'absence de puisage. Il en résulte une consommation de veille très importante (estimée respectivement à 1,5 et 1,1 m³ de gaz par jour) qui se répercute ici sur le rendement de chauffage et sur la consommation ECS (identifiées par la mention « PA » pour Pertes à l'Arrêt dans la partie ECS au §5.1. Pour le troisième logement où ce mauvais rendement est constaté, nous n'avons pas pu échanger avec le ménage pour élucider ce mauvais résultat.

On note aussi que les deux chaudières ayant les plus mauvais rendement sont surdimensionnées, avec un puissance respective de 32 kW et 25 kW, et sont non modulantes. Elles fonctionnent ainsi en courts cycles.

On précise enfin que pour le logement 200205, la chaudière gaz n'est qu'un appoint, le chauffage étant principalement assuré par un poêle à granulés. L'ECS reste impactée par ce mauvais rendement.

Le rendement moyen des chaudières gaz, si l'on exclut les 3 chaudières conservées qui dysfonctionnent, est de 84% (6 points de plus que la moyenne de l'ensemble).

Ce rendement des chaudières varie dans l'année, comme le montre le graphique suivant :

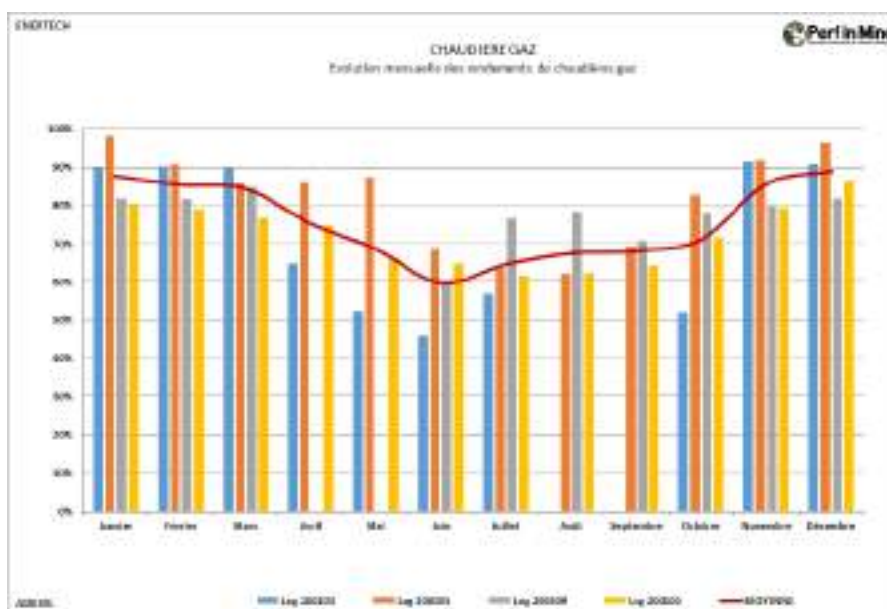


Figure 146 : saisonnalité des rendements de génération.

Cette saisonnalité s'explique par un meilleur rendement pour la production de chauffage, en hiver, que pour la production d'ECS seule, en été.

En moyenne, ces rendements de chaudières gaz se traduisent par des pertes de 18,4 kW.h_{ef}/m²/an qui s'ajoutent au besoin de chauffage (voir la Figure 147 ci-dessous). A comparer par exemple à l'objectif de consommation de 80 kW.h/m²/an qui est la valeur pivot du BBC rénovation. 18 kW.h/m²/an de pertes c'est déjà plus de 22% de cet objectif, c'est donc une valeur élevée.

A noter que cette moyenne intègre entre autre 3 chaudières conservées d'avant la rénovation dont les pertes estimées vont jusqu'à 76 kW.h_{ef}/m²/an. Pour au moins 2 de ces chaudières, ces pertes très importantes semblent s'expliquer par un maintien en température permanent du corps de chauffe, comme évoqué précédemment. On voit ici l'impact très important de ce maintien en température, qui est en réalité inutile, tout du moins pour les chaudières actuelles.

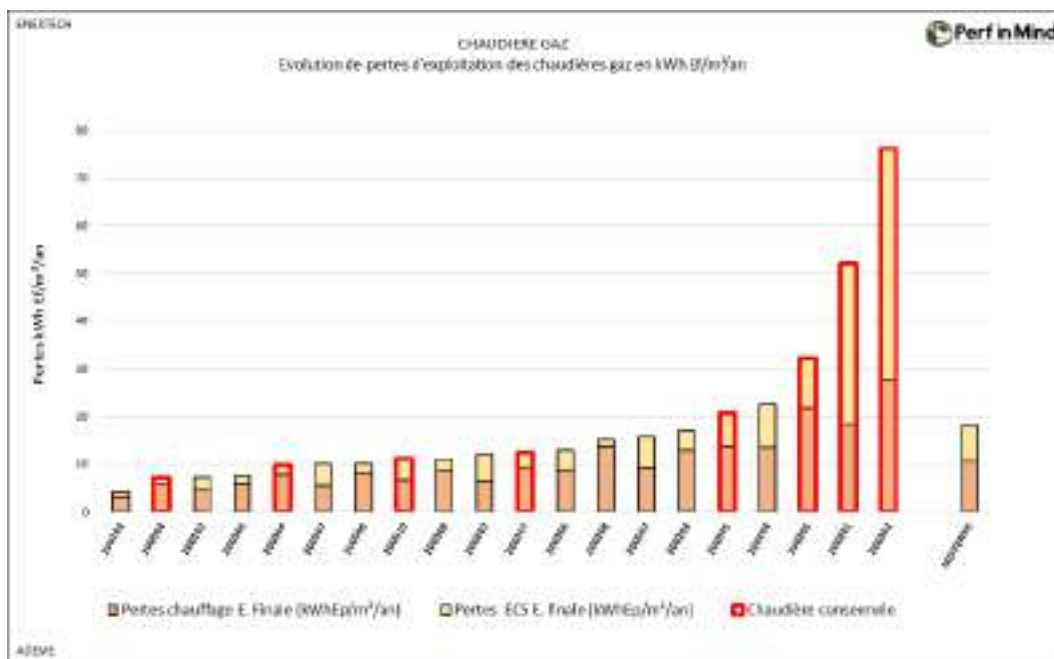


Figure 147 : Histogramme des pertes liées aux rendements de génération.

Les pertes moyennes si l'on exclut les 3 chaudières conservées ayant le plus mauvais rendement n'est plus que de **12,2 kW.h_{EP}/m²/an**.

❖ COP des PAC

Méthodologie :

Le COP présenté ici est le rapport de l'énergie utile en sortie de PAC et du ballon ECS, mesurée par des compteurs de chaleur, sur la consommation électrique. Ce calcul ne déduit donc pas les pertes des ballons de stockage ECS, ce qui est normalement le cas. Ainsi le COP pour l'ECS est une évaluation pessimiste.

Ce mode de calcul explique notamment le COP inférieur à 1 en été pour l'un des logements suivis.

Le graphique suivant présente l'évolution du COP (pertes du ballon non déduites, comme expliqué dans l'encadré ci-dessus) pour les 3 maisons équipées de pompes à chaleur air-eau qui ont été instrumentées.

A noter que cet échantillon de 3 maisons n'est pas représentatif de l'ensemble des pompes à chaleurs, car il contient les 2 seules PAC géothermiques mais une seule PAC air-eau alors qu'il y a en a 16 au total. Les PAC géothermiques sont donc largement sur-représentées. De plus la PAC air-eau émet sur un plancher chauffant, ce qui est très favorable pour le COP.

Comme pour le rendement des chaudières, le COP chute en été car la production d'ECS, à plus haute température que le chauffage, est naturellement réalisée avec un moins bon rendement que le chauffage.

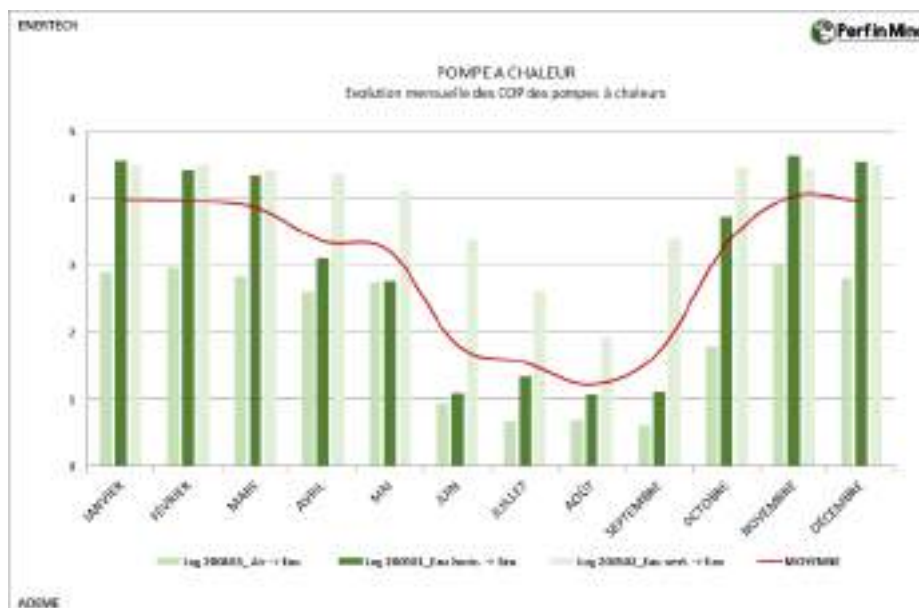


Figure 148 : saisonnalité des COP de PAC

COP moyen pour le chauffage :

- Pour la **PAC air-eau sur plancher chauffant** instrumentée, le COP pour le chauffage est de **3,38** (valeur mesurée pour 1 seule maison).
- On peut le comparer au COP moyen des **PAC air-eau sur radiateurs** (12 maisons en suivi base) dont nous avons pu récupérer les données de compteurs de chaleur (posés dans le cadre du suivi de performance EnergieSprong) : le COP moyen pour le chauffage est de **2,17**. L'écart important avec la PAC sur plancher chauffant s'explique en bonne partie par le régime de température plus élevé pour les radiateurs, qui dégrade le COP.
- Pour les **PAC géothermiques** (sur plancher également), le COP moyen pour le chauffage est de **5,13** (valeur mesurée sur 2 maisons).

On retrouve donc ici par la mesure **les principaux déterminants d'une PAC performante** :

- **Puiser l'énergie à la plus haute température possible**, donc idéalement dans le sol, sinon dans l'air si le climat est suffisamment clément ;
- **Emettre la chaleur à la température la plus basse possible**, donc idéalement dans un plancher chauffant, sinon dans des radiateurs réglés à basse température, ce qui n'est rendu possible que par une excellente isolation de l'enveloppe et une ventilation performante.

Le COP pour la génération ECS n'est pas connu : comme indiqué précédemment les données que nous avons incluent les pertes des ballons. Le ratio de la consommation électrique à l'énergie utile en ECS (puisages) est de 0,73 pour la PAC air-eau (donc comparable à ce que permettrait un ballon électrique. Ceci semble indiquer **un problème de régulation de l'appoint et/ou une consigne ECS trop élevée** qui est inatteignable par le compresseur).

Pour les PAC géothermiques ce ratio pour la production ECS est de 2,58 dans un cas et de 0,92 dans l'autre cas (cette seconde valeur indiquant également un probable problème de régulation de l'appoint et/ou de consigne).

4.3 Approche calculatoire

Afin d'agréger l'ensemble des données collectées sur les maisons, nous présentons ici un **calcul du besoin de chauffage** incluant aussi bien la performance de l'isolation, les masques solaires, l'étanchéité à l'air, les températures supposées ou mesurées, les débits attendus ou mesurés etc.

Plutôt qu'une méthode classique type « déperditions x DJU », qui s'avère peu adaptée au bâtiment performant où les apports gratuits compensent une part importante des déperditions, nous avons adopté un calcul dynamique inspiré de la simulation thermique dynamique.

❖ Méthodologie du calcul

Méthodologie :

Le calcul a été réalisé avec l'outil « **Besoin simple** » développé en interne par Enertech. Ce tableur utilise des données issues de la simulation thermique dynamique (STD), et la fiabilité de ses résultats a été vérifiée par comparaison avec des STD pour les logements collectifs et individuels, avec une précision meilleure que 10% dans tous les cas.

Cet outil fait un bilan au pas de temps journalier des déperditions et des apports gratuits, pour en déduire le besoin de chauffage restant. Les fichiers météorologies incluant les températures et les apports solaires pour des surfaces vitrées verticales sur 8 orientations calculées avec TRNSYS, et dont le facteur solaire peut être ajusté et combiné avec des masques solaires. Au total 30 fichiers météo ont été créés pour coller au plus près de chaque maison sur son année de mesure (voir à ce sujet le [§1.2.3](#)), avec également une correction de température avec l'altitude de chaque maison.

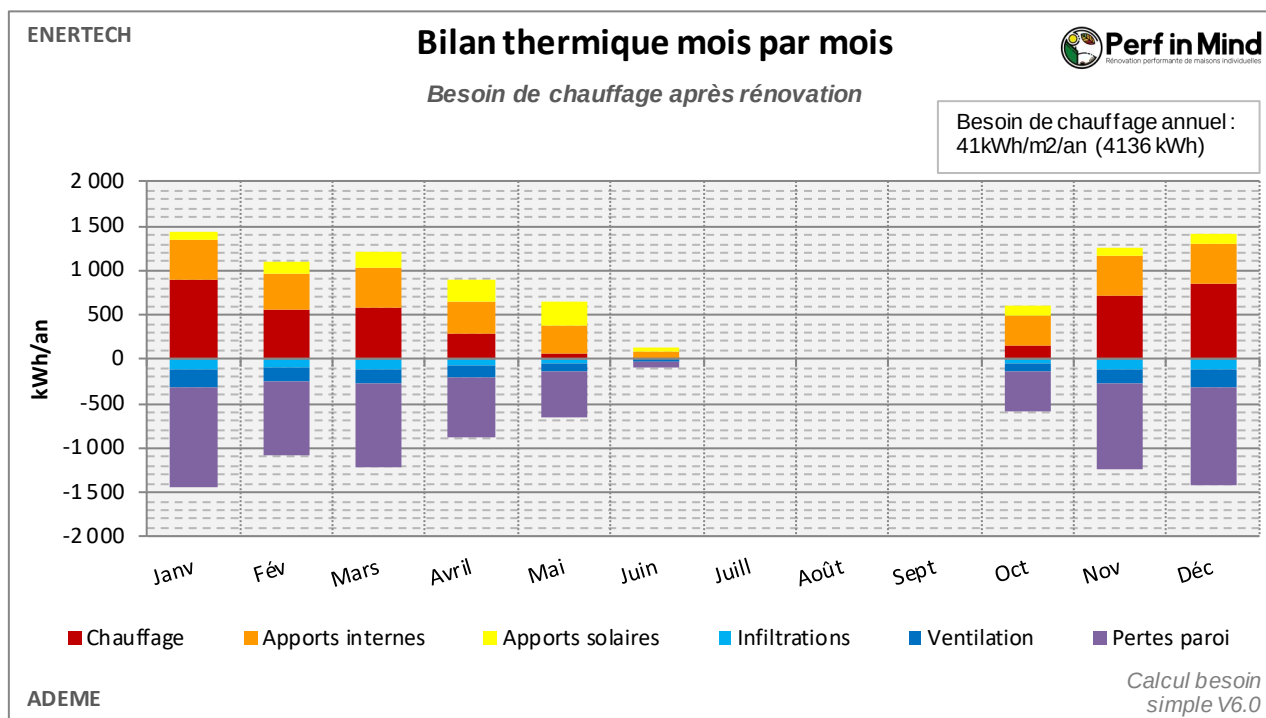


Figure 149 : Graphique illustrant la méthode de calcul de l'outil « Besoin simple » pour un cas médian.

Cet outil est alimenté par l'ensemble des données collectées sur les travaux réalisés (voir la méthodologie au début du chapitre [NATURE DES TRAVAUX](#)), complété par les résultats de test d'infiltrométrie lorsque nous avons pu les collecter (voir [§2.6](#)) et par les relevés de masques solaires

constatés sur site lors de l'instrumentation des suivis « avancés » (évaluation du masque fenêtre par fenêtre sur une échelle de 1 à 3). Les ponts thermiques sont évalués de façon automatisée (voir la méthodologie et les résultats au [§2.5](#)).

Sur ces données déjà, des incertitudes ont dû être prises en compte : certains métrés étaient non connus, ou contradictoires selon les sources (voir la comparaison entre ATbat du test d'infiltrométrie et celui calculé avec les données recueillies au [§2.7](#), Figure 91), l'évaluation des ponts thermique comporte une marge d'incertitude, les orientations des baies lorsqu'elles ne sont pas connues etc.

D'autres données nécessaires au calcul ne sont pas connues pour toutes les maisons, comme le niveau d'infiltrométrie, les débits réels de ventilation, l'efficacité réelle des échangeurs des ventilation double flux etc. Pour les cas où l'information n'est pas connue, nous avons fait des hypothèses et pris en compte leur variabilité (généralement la valeur moyenne en pivot et le premier et troisième quartile en valeur minimale et maximale).

A ces incertitudes viennent s'ajouter la variabilité de l'usage, notamment la température de chauffage et les apports internes, pour lesquelles nous avons travaillé avec la réalité mesurée et avec des hypothèses variables. Les apports internes humains sont déduits de l'occupation moyenne des logements déclarée dans le questionnaire. Les apports internes liés aux appareils sont les autres usages de l'électricité mesurés (voir [§6.3](#)) ou une hypothèse variable lorsqu'ils ne sont pas connus.

L'idéal aurait été de ne travailler qu'avec des données mesurées, mais bien évidemment plus on se limite aux données mesurées, plus le nombre de maisons où ces données sont disponibles est limité. Ainsi sur 103 maisons modélisées, seules 25 disposent d'un jeu de données de mesures et de test d'infiltrométrie complet. C'est pourquoi, afin de pouvoir analyser l'ensemble des maisons, nous avons effectué les calculs avec **différents jeux de données, ou « mode de calcul »**, de celui qui permet de modéliser l'ensemble des maisons avec beaucoup d'hypothèses, donc une forte incertitude, à celui qui ne prend en compte que des données mesurées, mais pour un nombre limité de maisons.

Mode de calcul	Description	Nombre de maisons où ce jeu de données est disponible
Sans mesure ni n50, météo RT	Aucune donnée de mesure, fichier météo standard de la zone climatique corrigé de l'altitude	103
Sans mesure ni n50, météo réelle	Idem avec fichier météo le plus proche, pour l'année de mesure	103
Mesure "base", sans n50, météo réelle	Idem avec température et apports interne mesurés	78
Mesure "base", n50 connu, météo réelle	Idem avec résultat de test d'infiltrométrie connu	57
Mesure "avancée", n50 connu, météo réelle	Idem avec résultats de mesure « avancés » : débit de ventilation et efficacité des échangeurs DF mesurée	25

Figure 150 : Tableau des « modes de calcul » des modélisations du besoin de chauffage.

L'ensemble des hypothèses variables est listé et les valeurs utilisées sont explicitées en [Annexe 1](#).

Les jeux **d'hypothèses variables** sont structurés en trois valeurs, valeur centrale, hypothèse « haute » et hypothèse « basse ». Les jeux d'hypothèses sont conçus pour **cumuler leur incertitude** : les hypothèses « basse » sont les bornes d'incertitude qui minimisent le besoin de chauffage, et les hypothèses « hautes » sont celles qui majorent le besoin de chauffage. L'exécution du calcul avec les jeux d'hypothèse « basse », centrale et « haute » permet ainsi de quantifier l'incertitude sur le calcul du besoin de chauffage.

Il sera ainsi intéressant de voir évoluer les barres d'incertitude lorsqu'on change de mode de calcul pour remplacer des hypothèses variables par des mesures. La finalité de cette comparaison est **d'évaluer l'intérêt en termes de gain de précision** sur la compréhension du besoin de chauffage que représente **un niveau d'instrumentation plus ou moins complexe**.

❖ Résultats du calcul en fonction des données utilisées

Les résultats de ces modélisations du besoin de chauffage des maisons est présenté par la suite en **comparaison avec le besoin de chauffage mesuré** ou calculé à partir de la mesure (voir le [§4.1.1](#)). Le besoin de chauffage issu de la mesure sera représenté sur **l'axe horizontal**. Sur **l'axe vertical** on indiquera le besoin de chauffage calculé avec les hypothèses centrales, et la barre d'erreur qui va du jeu d'hypothèses « basses » au jeu d'hypothèses « hautes ».

Si le calcul était parfaitement représentatif de la réalité, l'hypothèse centrale serait identique au besoin de chauffage mesuré, c'est-à-dire que le point sur la courbe serait **sur la droite centrale en pointillé gris** (abscisse = ordonnée). En pratique ce n'est pas le cas, c'est pourquoi nous avons aussi tracé en pointillé vert les droites correspondant à un écart de **+/-10%** entre calcul et mesure, que l'on peut considérer comme représentative de l'incertitude sur la mesure, et en pointillé orange les droites correspondant à ce même écart **encore majoré de +/- 20 kW.h/m²**, que l'on peut considérer comme représentative de l'incertitude de calcul liés aux paramètres non modélisés (notamment l'ouverture des fenêtres en hiver et les apports de chaleur humains réels).

Les maisons ayant fait l'objet d'un suivi « base » seront représentées en orange, celles en suivi « avancé » en bleu.

On pourra alors considérer la modélisation comme acceptable si le point correspondant à l'hypothèse centrale est entre ces droites en pointillé vert ou orange. A défaut, la barre d'incertitude devrait recouper la droite centrale en pointillés gris ou au moins croiser les droites en pointillé vert.

Le premier graphique ci-dessous présente les résultats du **mode de calcul dit « Sans mesure ni n50, météo RT », qui peut être comparé à un calcul de type 3CL-DPE** : en effet les métrés de ponts thermiques sont évalués au ratio, certains métrés peuvent être ponctuellement mal connus, la météo est celle de la zone climatique, et les hypothèses d'usage sont conventionnelles.

On voit Figure 151 que ce mode de calcul comporte **une incertitude très importante** : elle est en moyenne de **+45 / -33 kW.h/m²**. L'ensemble des barres d'erreur croise la droite centrale en pointillés gris, ce qui signifie que le besoin de chauffage réel mesuré est bien compris dans la barre d'erreur. Ce n'est cependant

pas le cas pour 3 maisons dont la barre d'erreur reste supérieure à la mesure, et 2 maisons dont la barre d'erreur reste inférieure à la mesure.

Ce mode de calcul est ici légèrement pessimiste, car la moyenne des calculs avec hypothèses centrales est de 48,3 kW.h/m² contre 45,0 kW.h/m² pour la mesure, soit un écart de +7%.

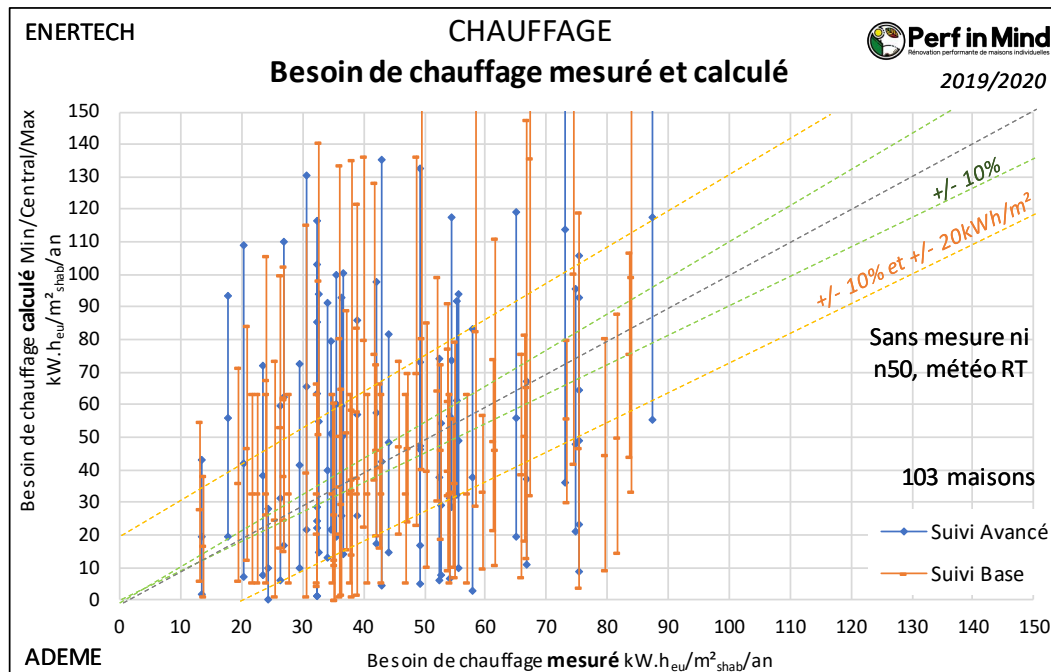


Figure 151 : Graphique de comparaison du besoin de chauffage mesuré (axe horizontal) et calculé avec incertitude (verticalement), pour le mode de calcul « Sans mesure ni n50, météo RT ».

Si l'on prend en compte à présent la **météo proche des maisons et pour l'année de mesure**, soit le mode de calcul « Sans mesure ni n50, météo réelle », on obtient les résultats suivants :

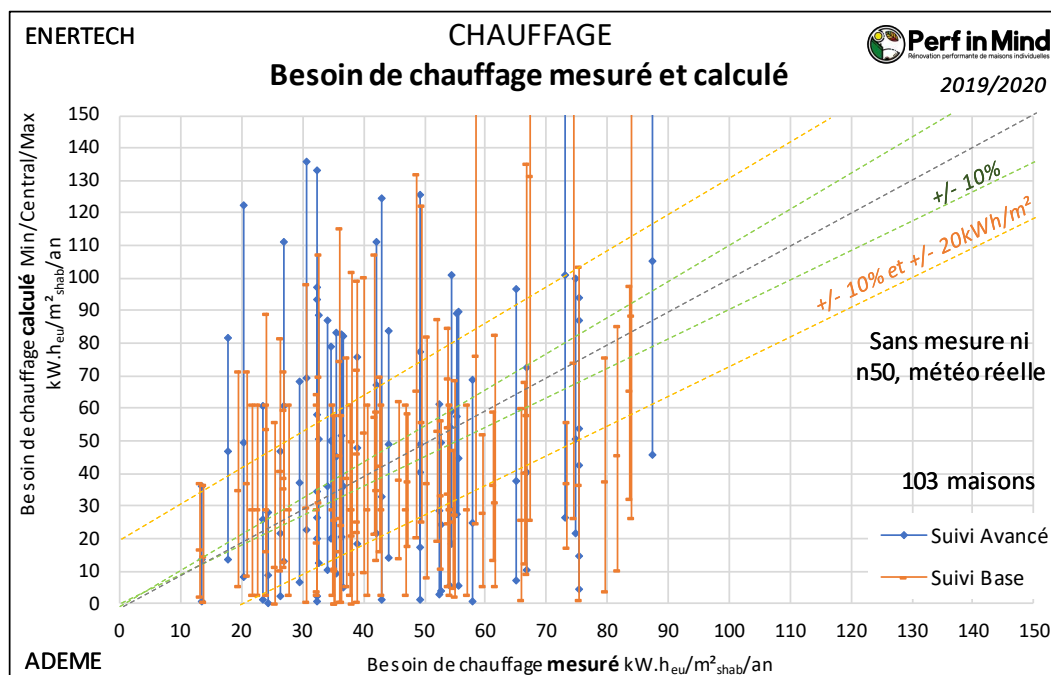


Figure 152 : Graphique de comparaison du besoin de chauffage mesuré (axe horizontal) et calculé avec incertitude (verticalement), pour le mode de calcul « Sans mesure ni n50, météo réelle ».

De façon logique, ce changement n'influe pas l'incertitude du calcul. On observe cependant un décalage des valeurs, qui reflète la météo plus chaude ou plus froide pour l'année de mesure que celles de la zone climatique (voir à ce sujet le §1.2.3). Il n'y a plus de maison dont la barre d'erreur reste supérieure à la mesure, mais pour 8 maisons la barre d'erreur reste inférieure à la mesure.

En moyenne, le climat de l'année de mesure 2019-2020 était plus chaud que les moyennes trentennales, puisque le besoin de chauffage calculé descend à 40,9 kW.h/m² soit une baisse de **-15%** par rapport au calcul avec les météos des zones climatiques. Le besoin de chauffage calculé devient ainsi inférieur au besoin réel mesuré, avec un écart de -9%.

La prise en compte des **données de mesure du suivi « base »**, soit la **température** moyenne intérieure et les **apports de chaleur** interne électriques, permet de réduire l'incertitude du calcul. Le nombre de maisons où ces données sont disponibles diminue à 78 maisons :

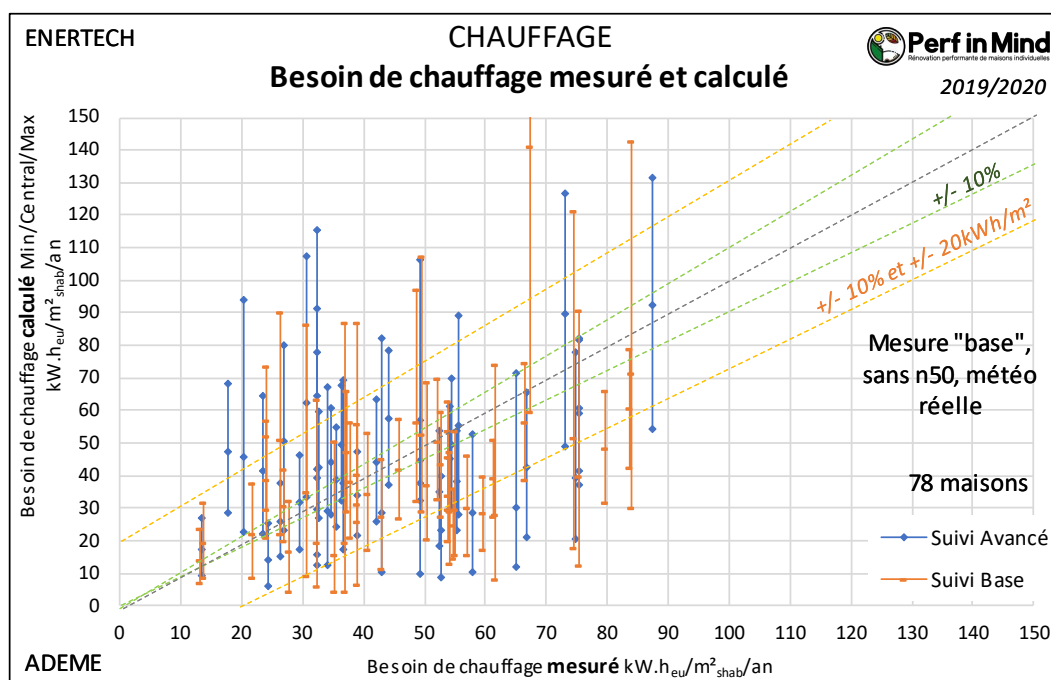


Figure 153 : Graphique de comparaison du besoin de chauffage mesuré (axe horizontal) et calculé avec incertitude (verticalement), pour le mode de calcul « Mesure « base » sans n50, météo réelle ».

L'incertitude sur le besoin de chaleur calculé se réduit ici à **+28 / -19 kW.h/m²**, soit environ 40% d'incertitude en moins par rapport à l'absence de mesure. Pour 5 maisons, la barre d'erreur reste supérieure à la mesure, et pour 13 autres la barre d'erreur reste inférieure à la mesure.

Le calcul reste optimiste, car le besoin moyen descend à 41,6 kW.h/m² contre 45,0 kW.h/m² pour la mesure, soit un écart de -7%.

Si l'on prend en compte à présent les résultats de **test d'infiltrométrie** (Figure 154 ci-dessous), l'échantillon se réduit à 57 maisons. L'incertitude sur le besoin de chaleur calculé se réduit encore à **+22 / -14 kW.h/m²**, soit environ de 25% d'incertitude en moins par rapport à l'absence de test d'infiltrométrie.

Pourtant il y a 6 maisons pour lesquelles la barre d'erreur reste supérieure à la mesure, et 18 dont la barre d'erreur reste inférieure à la mesure.

Le calcul est toujours optimiste, avec un besoin moyen de 41,4 kW.h/m², soit un écart de -8% avec la mesure.

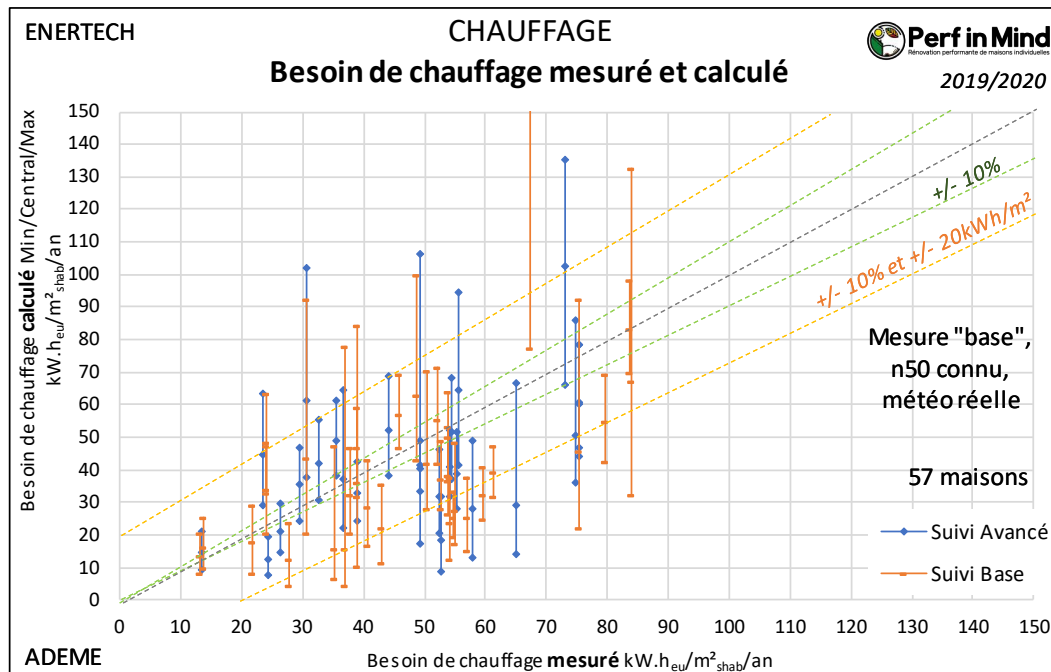


Figure 154 : Graphique de comparaison du besoin de chauffage mesuré (axe horizontal) et calculé avec incertitude (verticalement), pour le mode de calcul « Mesure « base », n50 connu, météo réelle ».

Enfin, si l'on intègre les données de mesure du suivi « avancé », avec la mesure du débit de ventilation et de l'efficacité de récupération de chaleur des ventilations double flux, on obtient les résultats de la Figure 155 ci-dessous, sur un échantillon de 25 maisons :

A noter que toutes ces maisons ont fait l'objet d'un suivi « avancé », ce qui a permis de procéder à un relevé des masques solaires, ce qui n'a pas été possible en suivi « base ».

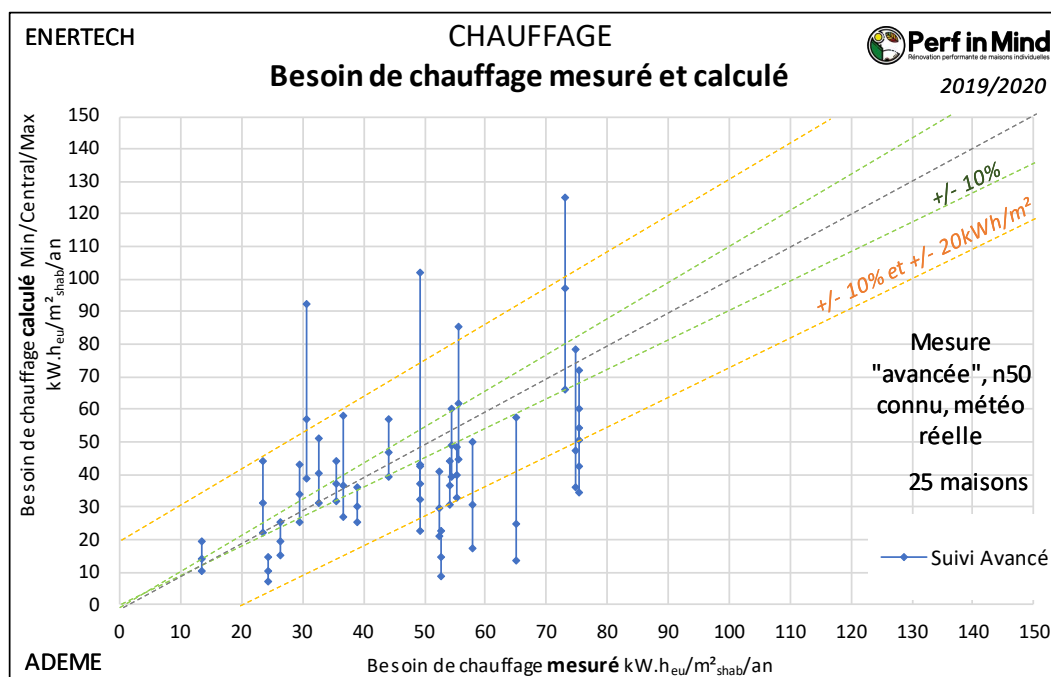


Figure 155 : Graphique de comparaison du besoin de chauffage mesuré (axe horizontal) et calculé avec incertitude (verticalement), pour le mode de calcul « Mesure « avancée », n50 connu, météo réelle ».

Le gain en précision est de nouveau significatif, puisque l'incertitude moyenne descend à **+15 / -11 kW.h/m²**, soit encore un gain d'environ 30% en précision par rapport à la mesure « base ». **Au total, les données de mesure ont permis une division par 3 de l'incertitude** par rapport au mode de calcul sans mesure.

Il ne reste **qu'une maison dont la barre d'incertitude est supérieure à la mesure** (+8 kW.h/m²). Il nous semble probable que ceci s'explique par des écarts de données sur les métrés. En effet sur cette opération, la valeur de la surface habitable variait du simple au double selon les sources, car la surface chauffée a augmenté à l'occasion des travaux au niveau du rez-de-chaussée et de plus des combles ont été aménagés mais pas encore chauffés. Il en résulte une grande confusion sur la définition du volume chauffé et des métrés associés.

La part de maisons dont la barre d'incertitude est inférieure à la mesure grimpe à près de 50% (12 maisons sur 25). L'écart entre le calcul sur hypothèse haute et la mesure varie de 1 à 30 kW.h/m², en moyenne 10 kW.h/m² sur les 12 maisons concernées. Ce phénomène important peut trouver sa source dans les incertitudes non modélisées ici, notamment **l'ouverture des fenêtres en hiver**, qui n'a pas été mesurée ni modélisée dans le calcul, et qui peut tout à fait expliquer une hausse significative du besoin de chauffage. L'autre explication de cet écart peut être que les **travaux réellement réalisés** ont été moins performants ou moins complets que les données que nous avons prises en compte. On peut penser en particulier aux **ponts thermiques intégrés**, provoqués par les rails, suspentes métalliques, chevilles métalliques, qui traversent les isolants et qui en dégradent la performance effective. Voir à titre d'illustration la thermographie du pont thermique intégré d'un rail en ITI [Figure 85](#).

Globalement la moyenne des besoins de chauffage calculé diminue avec la prise en compte de ces données, car la mesure des débits de ventilation a fait apparaître de nombreux cas de sous-débits de ventilation, qui réduisent le besoin de chauffage (mais dégradent la qualité de l'air intérieur, voir la [partie 9](#)). La **valeur moyenne de besoin de chauffage calculé baisse à 40,0 kW.h/m²**, soit 11% de moins que la

moyenne mesurée des 103 maisons, ou encore 15% de moins que la moyenne mesurée des 25 maisons concernées (47,2 kW.h/m²).

On peut récapituler l'impact successif de la prise en compte des données de précision croissante sur le graphique suivant. Nous avons différencié pour l'occasion la prise en compte des températures intérieures de celle des apports internes mesurés (au sein des mesures du suivi « base »).

On observe par exemple sur la Figure 156 ci-dessous que la prise en compte de la météo réelle a en moyenne fait baisser le besoin de chauffage calculé de -7 kW.h/m², mais que dans certaines régions c'est l'effet inverse qui s'est produit. L'impact de la météo est l'effet le plus important en valeur moyenne.

Cependant l'effet le plus important en termes de dispersion des données (écart entre Q1=-10 et Q3=4) est celui de la prise en compte de la température intérieure mesurée, suivi de celui des apports internes.

Comme nous l'avons vu précédemment, la mesure d'infiltrométrie et celle des mesures sur la ventilation permettent un gain en précision supplémentaire, qui est moindre en valeur absolue mais reste important en valeur relative (pourcentage d'évolution de la largeur de la fourchette).

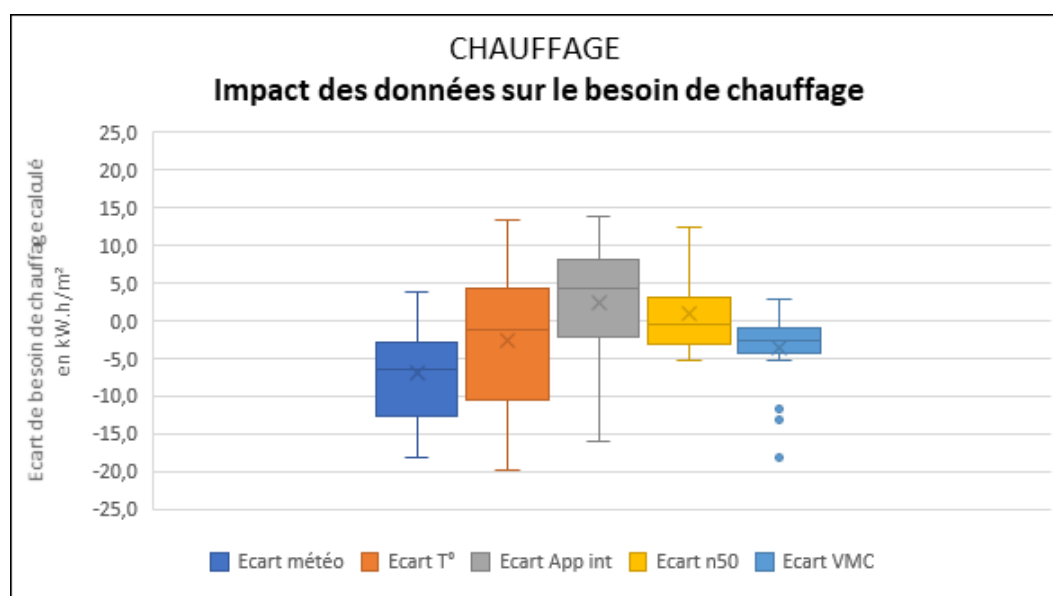


Figure 156 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) de l'impact des jeux de données utilisées sur la modélisation du besoin de chauffage, pour les 25 maisons où l'ensemble des données étaient disponibles.

Pour conclure ce paragraphe, il est important de rappeler que **toute modélisation thermique ne vaut que par la précision des données d'entrées**. Or les logements sont des objets complexes dont les variables technique et d'usage sont nombreuses et pour certaines difficiles à mesurer. Le recollement entre mesure et calcul reste donc un exercice difficile, et qui ne peut aboutir à une corrélation parfaite. Cependant, on peut noter que plus on inclut de données mesurées dans le calcul, plus on en réduit l'incertitude. **Les efforts de mesure déployés dans ce projet au niveau « base » et au niveau « avancé » sont justifiés par ce gain important en précision d'analyse**. Notre seul regret reste que la métrologie prévue n'ait pas permis de monitorer l'ouverture des fenêtres (mais de toutes façons nous n'aurions pas pu mesurer les débits). Cette donnée reste la principale variable d'usage non mesurée et explique probablement l'écart restant entre le calcul le plus détaillé et la mesure, en complément d'incertitude sur les métrés.

❖ Enseignements de l'approche calculatoire

Maintenant que nous avons explicité le modèle calculatoire utilisé et montré sa représentativité mais aussi ses limites, nous allons pouvoir utiliser ce modèle pour **mieux comprendre les déterminants du besoin de chauffage** des maisons suivies.

Dans ce paragraphe, nous allons utiliser un **nouveau mode de calcul, que l'on peut nommer « au mieux »**, qui utilise **toutes les données de mesure connues**, et qui complète par **l'hypothèse centrale** si la mesure n'est pas disponible.

Les sorties du calcul « Besoin simple » permettent de distinguer les pertes thermiques et les apports gratuits. Nous représenterons ces données sous la forme de barreaux côté négatif pour les pertes thermiques, et côté positif pour les apports gratuits. Le besoin de chauffage complète les apports gratuits pour compenser les déperditions (la somme des barreaux positifs est toujours égale à la somme des barreaux négatifs).

Le premier graphique ci-dessous présente le bilan des pertes, apports et besoin de chauffage pour l'ensemble des 103 maisons modélisées, et par mode de définition de la performance (voir à ce sujet le §1.3.2).

On observe que, si les déperditions sont différentes selon la performance visée, en revanche la contribution des apports gratuits est du même ordre de grandeur : les apports solaires compensent ainsi environ 30% des pertes thermiques, et les apports internes environ 25% supplémentaires. **C'est au total autour de 55% des pertes qui sont compensées par les apports gratuits.** Ceci explique pourquoi la corrélation du besoin de chauffage aux DJU ne fonctionne pas à ce niveau de performance (voir les §4.2.2 et 4.2.3).

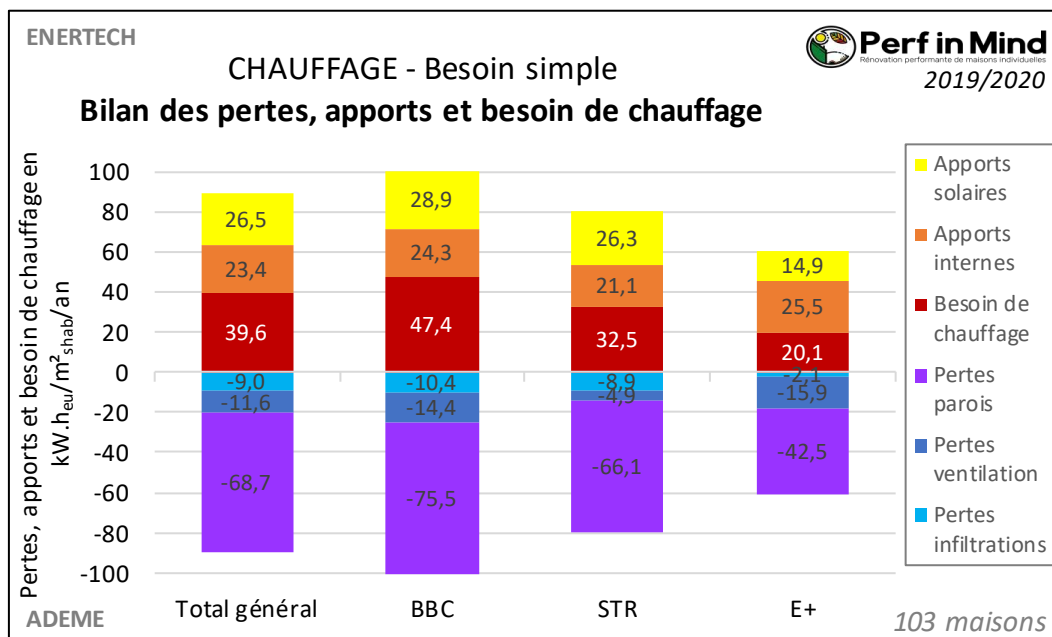


Figure 157 : Graphique du bilan des pertes, apports gratuits et besoin de chauffage moyens des maisons modélisées, au global et par mode de définition de la performance.

On note que la contribution des apports solaires est plus sensiblement faible sur les 12 maisons à énergie positives, qui sont des maisons en bande orientées Sud-Ouest et Nord-Est. En revanche la densité d'apports internes au m^2 est plus importante (ce qui peut s'expliquer par une plus grande densité d'occupation : 34 m^2 par personne contre 46 en moyenne sur l'ensemble des maisons). Au total ce sont les 2/3 des pertes thermiques qui sont compensées par les apports internes sur cette opération.

L'approche calculatoire permet également de dépasser le constat des travaux réalisés, et de tester des **études variationnelles** sur certains paramètres de conception, de mise en œuvre et d'usage :

- Etude variationnelle : impact des infiltrations

En premier lieu, nous avons testé l'impact des infiltrations, pour le mode de calcul « au mieux » (présenté au [début de ce paragraphe](#)) puis en forçant les valeurs successives de $n_{50} = 1 \text{ vol/h}$, 3 vol/h et 5 vol/h .

On voit Figure 158 que ces infiltrations croissantes augmentent les déperditions, ce qui se répercute sur le besoin de chauffage qui passe en moyenne de $34,4 \text{ kW.h/m}^2$ à $44,1 \text{ kW.h/m}^2$, ce qui représente **$2,4 \text{ kW.h/m}^2$ de besoin de chauffage par point de n_{50}** . Cette valeur moyenne fait l'objet d'une certaine dispersion, liée à la forme du bâtiment et en particulier sa hauteur sous plafond, mais aussi à ses apports internes et solaires. L'impact varie ainsi de $1,2$ à $4,3 \text{ kW.h/m}^2$ de besoin de chauffage par point de n_{50} .

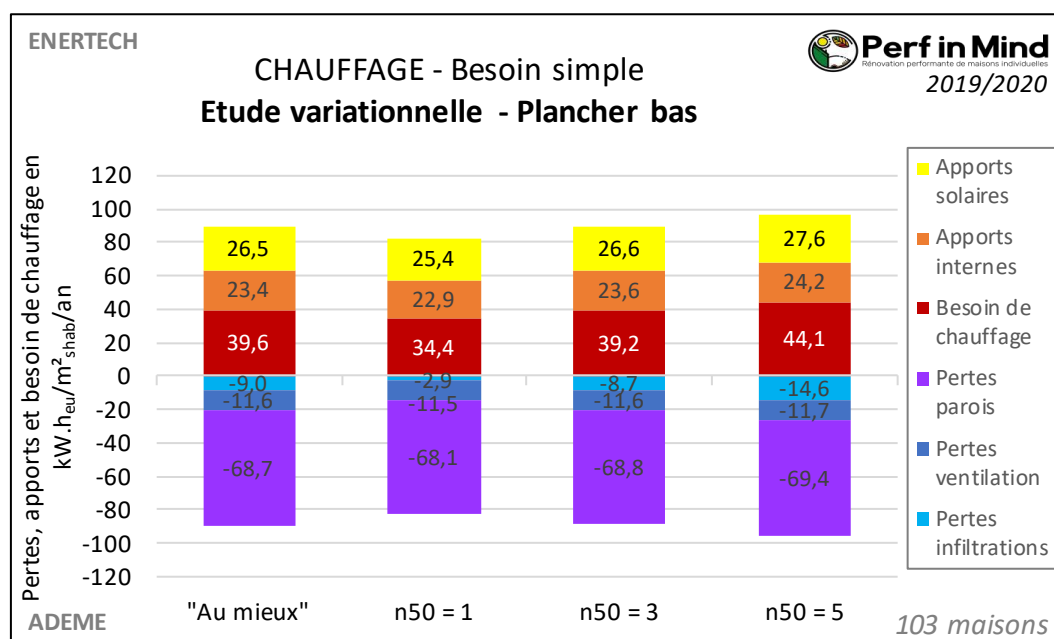


Figure 158 : Graphique du bilan de besoin de chauffage moyens, étude variationnelle en forçant la performance d'étanchéité à l'air à $n_{50} = 1 \text{ vol/h}$, 3 vol/h et 5 vol/h .

- Etude variationnelle : impact du type de ventilation

Nous nous intéressons ici au choix du type de ventilation, en particulier les 3 principales solutions utilisées sur les maisons suivies, soit la ventilation simple flux autoréglable (VSF auto), hygroréglable (VSF hygro) et la ventilation double flux (VDF).

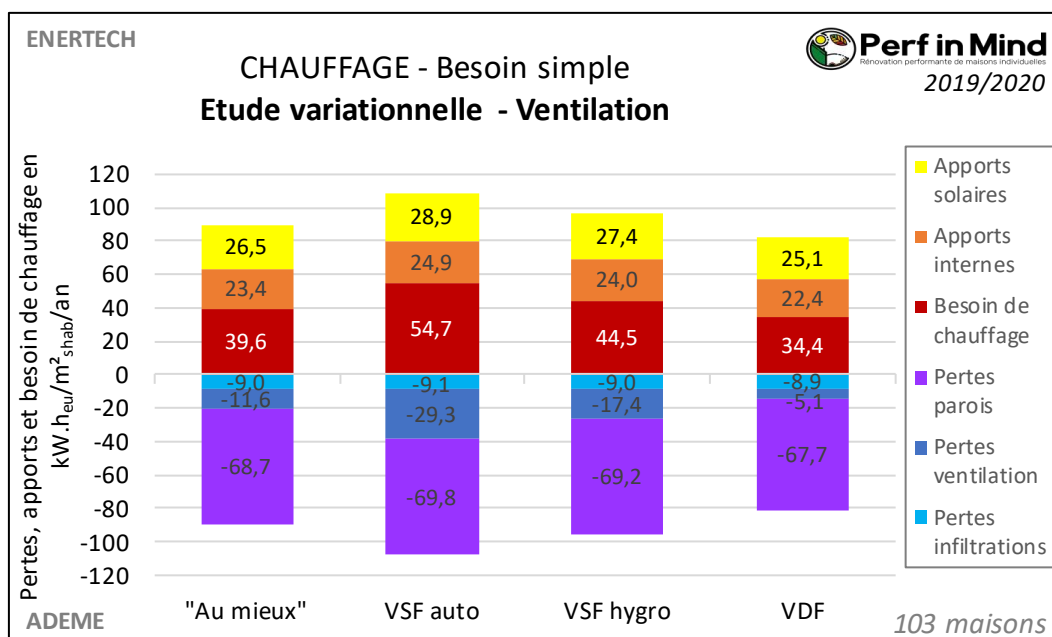


Figure 159 : Graphique du bilan de besoin de chauffage moyens, étude variationnelle en forçant le type de ventilation en ventilation simple flux autoréglable ou hygroréglable, et en double flux.

La modélisation est basée sur les renouvellements d'air attendus, soit 0,5 vol/h en VSF autoréglable et en double flux, et 0,3 vol/h en hygroréglable. On verra que les débits réels ont pu être très différents de ces débits attendus (voir §3.1.3 pour les débits et §6.1.3 pour la comparaison en chauffage au débit mesuré et bilan avec la consommation électrique de la ventilation). Pour les double flux l'efficacité de l'échangeur prise en compte est la moyenne des efficacités mesurées (hormis 1 cas d'échangeur « fait maison ») soit 82%.

Sur cette base, le choix de ventilation impacte les pertes de chaleur par renouvellement d'air, et le besoin de chauffage qui varie en moyenne de 54,7 $\text{kW.h}/\text{m}^2$ de besoin de chauffage en simple flux autoréglable à 44,5 $\text{kW.h}/\text{m}^2$ en hygroréglable, et jusqu'à 34,4 $\text{kW.h}/\text{m}^2$ en double flux. **On retrouve bien ici l'enjeu de plus de 20 $\text{kW.h}/\text{m}^2$ de besoin de chauffage** sur la récupération de chaleur de l'air extrait. La double flux permet la meilleure performance énergétique avec un gain de plus de **20 $\text{kW.h}/\text{m}^2$** par rapport à l'autoréglable. L'hygroréglable permet une performance intermédiaire entre autoréglable et double flux avec un gain de plus de **10 $\text{kW.h}/\text{m}^2$** par rapport à l'autoréglable.

Ce constat nous rappelle à quel point la ventilation est un sujet important, à la croisée d'enjeux parfois contradictoires :

- La ventilation est souvent mal comprise par les utilisateurs et qu'elle génère dans 30 % des cas des nuisances acoustiques (en simple comme en double flux), voir le §1.5 ;
- Quel que soit le type de ventilation, une bonne mise en œuvre et un bon réglage est nécessaire au bon fonctionnement et à la satisfaction des habitants. Or les débits ont globalement été mal réglés : on observe de nombreux sur-débits en ventilation simple flux hygroréglable, et de nombreux sous-débits en ventilation double flux (voir §3.1.3) ;
- La question de la maintenance et des coûts associés doit être abordée plus en amont. L'enquête sociologie a montré que les ménages n'ont parfois pas été avertis de ces coûts. 41 % sont moyennement satisfaits ou insatisfaits de ce poste de dépenses (voir §1.5).

- Les consommations électriques sont généralement plus importantes en double flux, mais peuvent être maîtrisées par une bonne conception et une bonne mise en œuvre, voir au §6.1. Quoi qu'il en soit le gain énergétique sur le chauffage compense largement la surconsommation d'électricité, voir le bilan réalisé au §6.1.3 ;
- Le choix de la ventilation et notamment le taux de renouvellement d'air a un impact sur la qualité d'air intérieur, ce qui plaide en défaveur de la solution hygroréglable sur l'ensemble des polluants mesurés, et en particulier sur la question du Radon, voir le chapitre 10 ;
- Enfin nous verrons au §10.3 que la ventilation double flux est plus chère que la solution hygroréglable.

- Etude variationnelle : impact de la température de consigne

Nous nous intéressons maintenant à la température de consigne de chauffage. Nous la ferons varier de 19°C à 21°C.

On constate Figure 160 que l'augmentation de la consigne fait augmenter l'ensemble des pertes thermiques, et par conséquent augmente le besoin de chauffage. Celui-ci passe de 34,6 kW.h/m² pour 19°C à 47,0 kW.h/m² à 21°C. Cet écart est donc de 6,2 kW.h/m² par °C de consigne, soit +17% par °C.

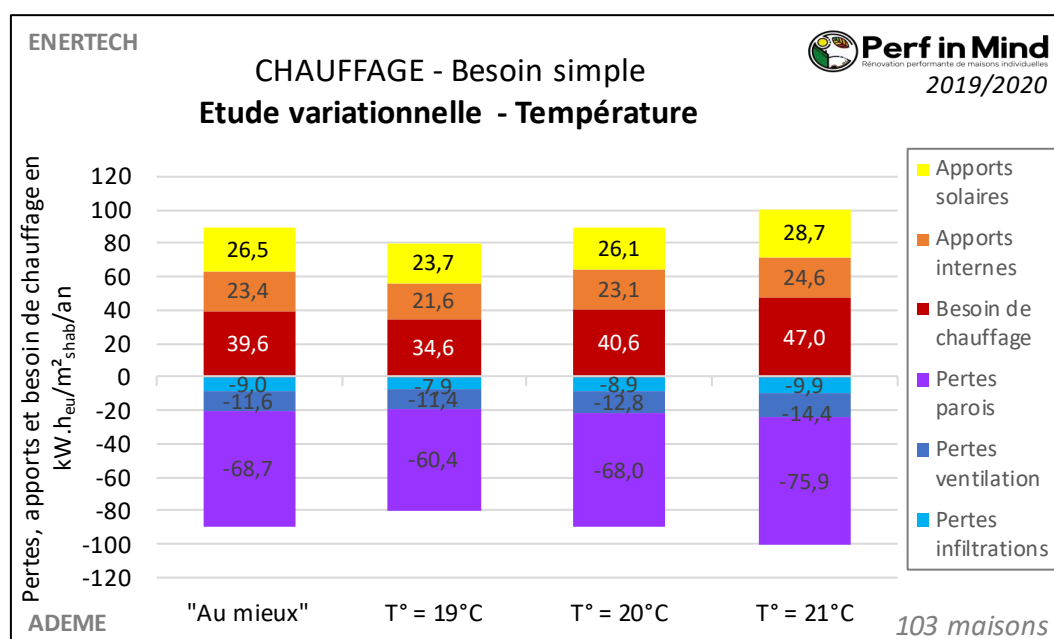


Figure 160 : Graphique du bilan de besoin de chauffage moyens, étude variationnelle en forçant une température de consigne de 19°C, 20°C et 21°C.

- Etude variationnelle : impact du traitement des planchers bas non isolés

Nous avons cherché enfin à quantifier l'impact de l'isolation périphérique du plancher bas par rapport à l'absence totale d'isolation, pour les 30 maisons dont le plancher bas principal est non isolable (sur terre-plein, sur vide sanitaire non accessible ou sur sous-sol non isolable par manque de place).

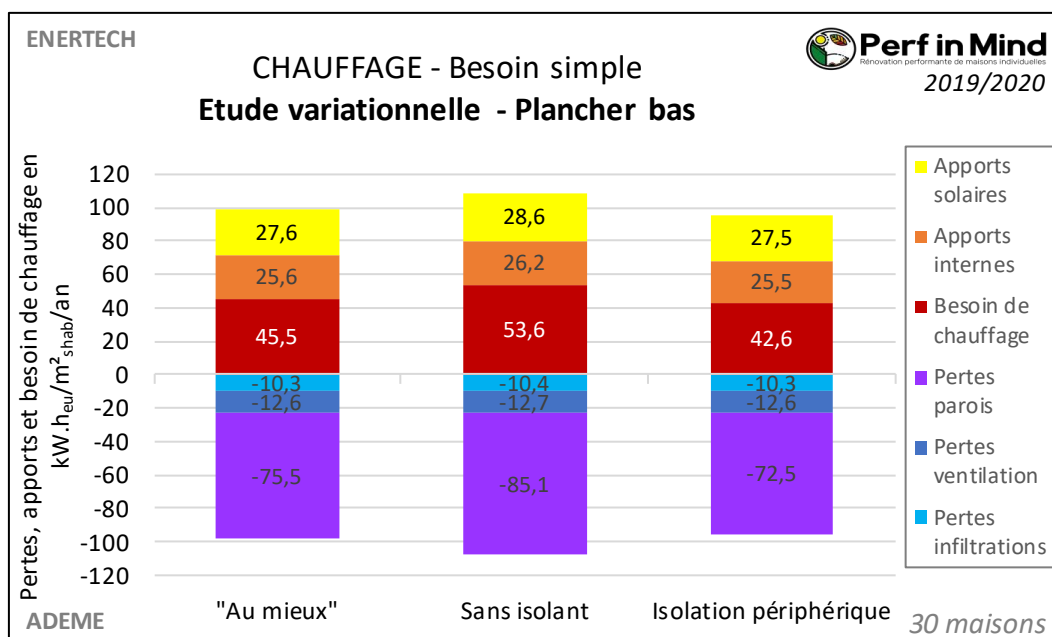


Figure 161 : Graphique du bilan de besoin de chauffage moyens des maisons dont le plancher bas principal est non isolable, étude variationnelle en forçant l'absence d'isolation ou l'isolation périphérique.

On voit Figure 161 que l'isolation périphérique réduit de façon importantes les déperditions, ce qui se solde par un gain sur le besoin de chauffage de 11 kW.h/m^2 en moyenne.

A noter que cette moyenne cache de fortes disparités entre les terre-pleins où l'impact de l'isolation périphérique n'a pas été modélisée finement (gain nul) et les vides sanitaires où le gain peut atteindre une cinquantaine de kW.h/m^2 . Ces valeurs restent donc à prendre avec précaution, compte tenu de l'incertitude de modélisation et de la variabilité du modèle selon la conductivité du sol (voir à ce sujet le §2.5.1 et l'Annexe 1).

En tout état de cause, et au-delà de l'incertitude sur la valeur quantifiée, on retiendra **l'intérêt de cette isolation périphérique dans le cas où l'isolation est impossible**. On peut souligner également l'intérêt des **robots capables de projeter de l'isolant** (actuellement uniquement du polyuréthane) **au plafond des vides sanitaires de faible hauteur**.

Figure 162 ci-contre : Illustration d'un robot permettant projeter du polyuréthane en sous-face d'un vide sanitaire de faible hauteur. Source : www.syneris-isolation.fr



5 Eau chaude sanitaire mesurée

5.1 Consommation annuelle

Méthodologie

La méthodologie d'analyse est commune au chauffage et à l'ECS, l'un des principaux enjeux étant justement de discriminer ces deux usages.

La méthode de détermination des consommations d'ECS dans les différentes configurations rencontrées est présentée au paragraphe [Méthodologie](#) en début de partie CONSOMMATIONS, et détaillée en [Annexe 2](#).

Nous rappelons à ce titre que les données portant sur l'ECS contiennent globalement une « part calcul » plus importante que les consommations de chauffage, surtout dans les cas suivants :

- Logements avancés : production commune chauffage/ECS avec un compteur de chaleur placé au puisage ;
- Logements base (annualisation saisonnalisée des consommations estivales)

5.1.1 ECS en énergie finale

Le bilan des consommations d'ECS en énergie finale est présenté en Figure 163 :

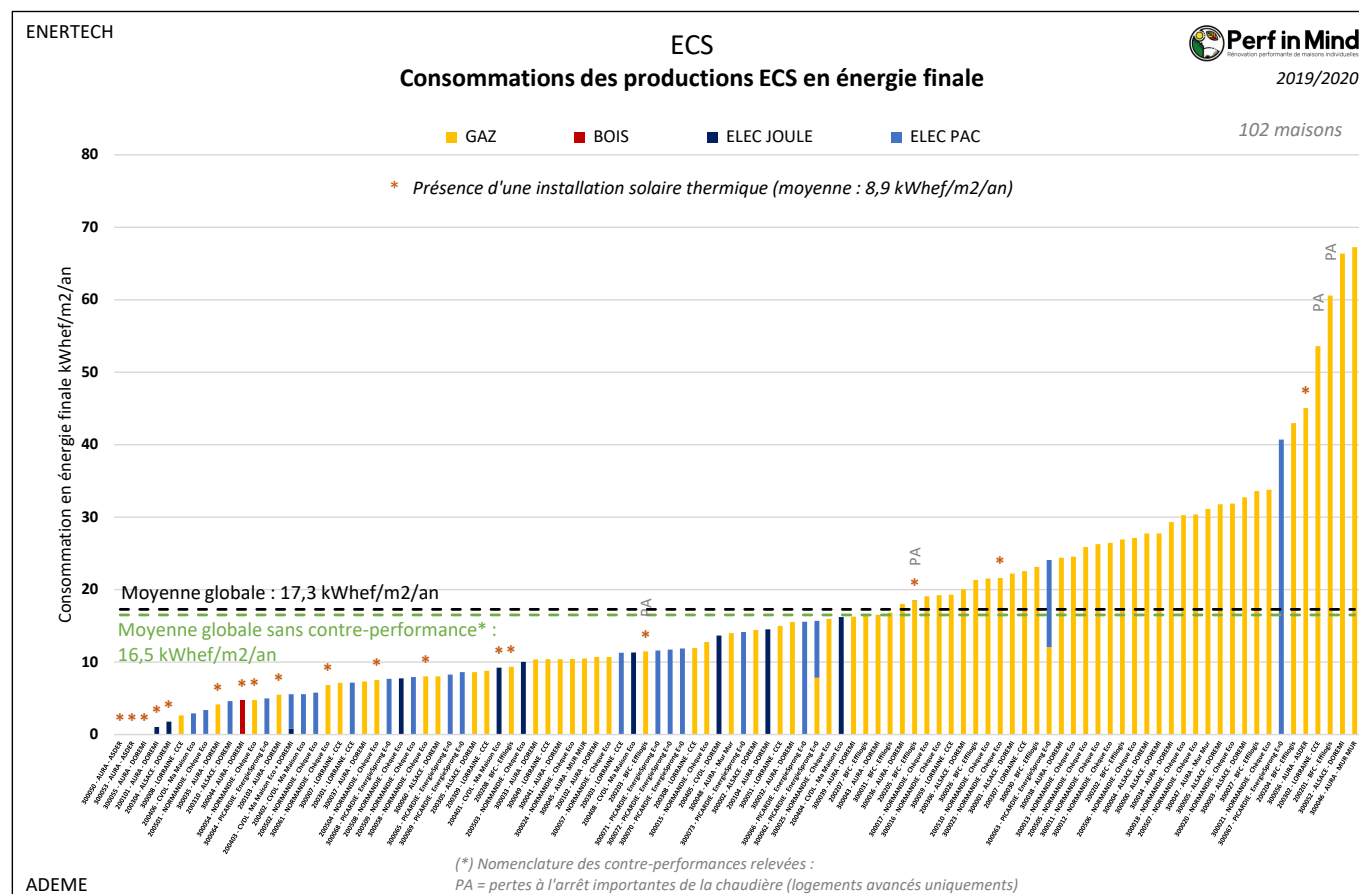


Figure 163 : Consommations d'ECS des projets en énergie finale.

La moyenne s'établit à **17,3 kW.h_{ef}/m²/an**, ou 16,5 kW.h_{ef}/m²/an (soit 5% de moins) si l'on exclut les projets dont les pertes à l'arrêt chaudière ont été décelées comme particulièrement élevées (mention « PA » au sommet du barreau).

Cette consommation est 3 fois inférieure à la consommation finale moyenne de chauffage.

On note une consommation d'ECS nulle pour 3 logements et inférieure à 5 kW.h/m² pour 2 autres logements disposant d'une installation solaire thermique. Celle-ci est parfois fortement dimensionnée (1 maison équipée de 7m² de capteurs), ce qui peut permettre 100% de couverture du besoin. Les autres ont une installation plus classique (1 ou 2 capteurs) et appliquent une certaine sobriété d'usage. Certains n'hésitent pas à adapter leur usage à la température du ballon solaire pour éviter de solliciter l'appoint, choisissant par exemple de se laver au gant de toilette certains jours plutôt que de prendre une douche.

Les **productions d'ECS électriques** (ballon électrique et ballon thermodynamique) se situent dans la moitié la moins consommatrice (en énergie finale) du fait des rendements d'exploitation inférieurs des autres systèmes, mais surtout des COP des productions thermodynamiques.

Les **productions au gaz** se retrouvent à toutes les échelles de consommation d'ECS. On rappelle ici, car cela a déjà été vu sur la partie chauffage (voir [§4.2.5](#)), que certaines vieilles chaudières gaz ou chaudières gaz mal réglées ont des pertes à l'arrêt très importantes qui bouleversent totalement le bilan de consommation du logement. Ce phénomène n'a malheureusement pas pu être analysé sur les logements « base » mais il est probable que certains d'entre eux soient concernés, comme par exemple les logements 300052 et 300046 qui présentent les consommations les plus élevées du projet avec presque 70 kW.h_{ef}/m²/an, ce qui semble tout à fait considérable.

Les logements disposant d'une **installation solaire thermique** (18 en tout) sont indiqués sur le graphique et affichent une consommation finale moyenne de 8,9 kW.h_{ef}/m²/an tandis que les logements qui n'en disposent pas ont une consommation moyenne de 19,1 kW.h_{ef}/m²/an. On retient donc ici que les installations solaires thermiques permettent **en moyenne une division par deux** de la consommation d'eau chaude. La réalité est évidemment plus diverse avec 3 logements qui parviennent à se passer totalement d'énergie appoint comme nous l'avons vu !

5.1.2 ECS en énergie primaire

La consommation d'ECS en énergie primaire est indiquée en Figure 164. La moyenne des consommations s'établit à **21,8 kW.h_{ep}/m²/an** et 21,3 kW.h_{ep}/m²/an si l'on exclut les logements dans lesquels on a pu déceler des pertes à l'arrêt anormales de la chaudière (mention « PA »).

Cette consommation moyenne est 2,4 fois inférieure à la consommation moyenne de chauffage en énergie primaire.

On constate que parmi les **productions électriques**, seules les productions thermodynamiques ou les productions utilisant l'énergie solaire parviennent à se maintenir sous la moyenne. Les autres productions électriques (même certaines productions thermodynamiques à mauvais COP) se trouvent déportées au-delà de 25 kW.h_{ep}/m²/an.

Les logements avec une **installation solaire thermique** affichent une consommation primaire moyenne de 9,8 kW.h_{ep}/m²/an tandis que les logements qui n'en disposent pas ont une consommation primaire de

24,4 kW.h_{ep}/m²/an. Le bénéfice énergétique du solaire s'établit donc en moyenne ici à 14,6 kW.h_{ep}/m²/an ce qui est tout à fait significatif. Un peu plus de détail sur la variabilité de ces résultats sera présenté au §5.2.4.

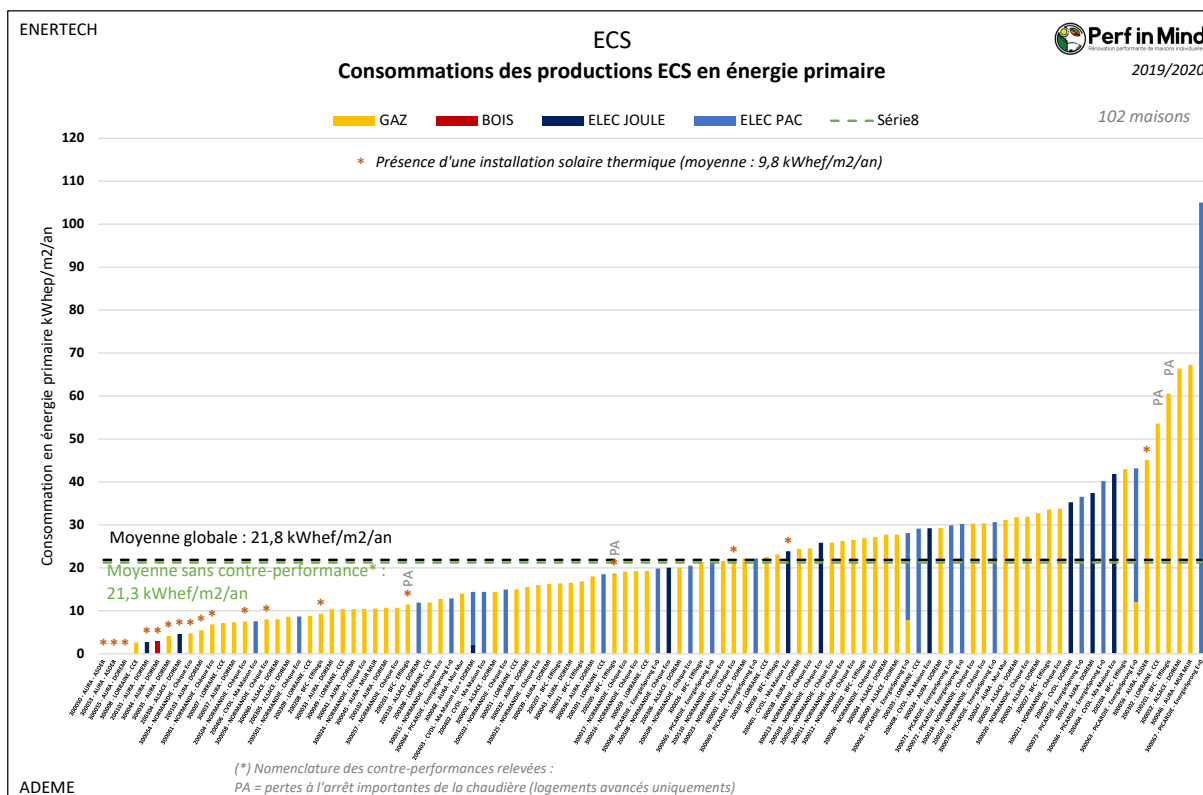


Figure 164 : Consommations d'ECS des projets en énergie primaire.

5.2 Paramètres influant sur la consommation

Méthodologie :

Pour le suivi des variables explicatives sur l'ECS, il n'était pas prévu d'instrumentation pour les suivis « base ». Aucune variable explicative n'est disponible, la consommation d'ECS a été estimée par comparaison entre les relevés de compteurs en période de chauffe (Chauffage + ECS) et hors période de chauffe (ECS seul). Voir la [méthodologie](#) au début de la partie CONSOMMATIONS.

Pour les suivis « avancés », des compteurs de chaleur ont été prévus seulement pour les chaudières double service, pour discriminer les usages ce qui a été présenté précédemment. De plus, des sondes de températures ont été placées immédiatement en sortie de ballon, en espérant avoir ainsi un indicateur de la température de stockage. Cependant en réalité la mesure de température au pas de temps de 10min n'est pas assez précise pour capter l'information au moment de puisages qui pour la plupart ont une durée bien inférieure à 10min. Cette variable explicative n'a donc pu être exploitée.

Les variables explicatives présentées ici seront donc limitées aux mesures instantanées de débit réalisées pendant l'instrumentation des suivis « avancés », la composition des ménages en nombre de personnes, et la présence d'une installation solaire.

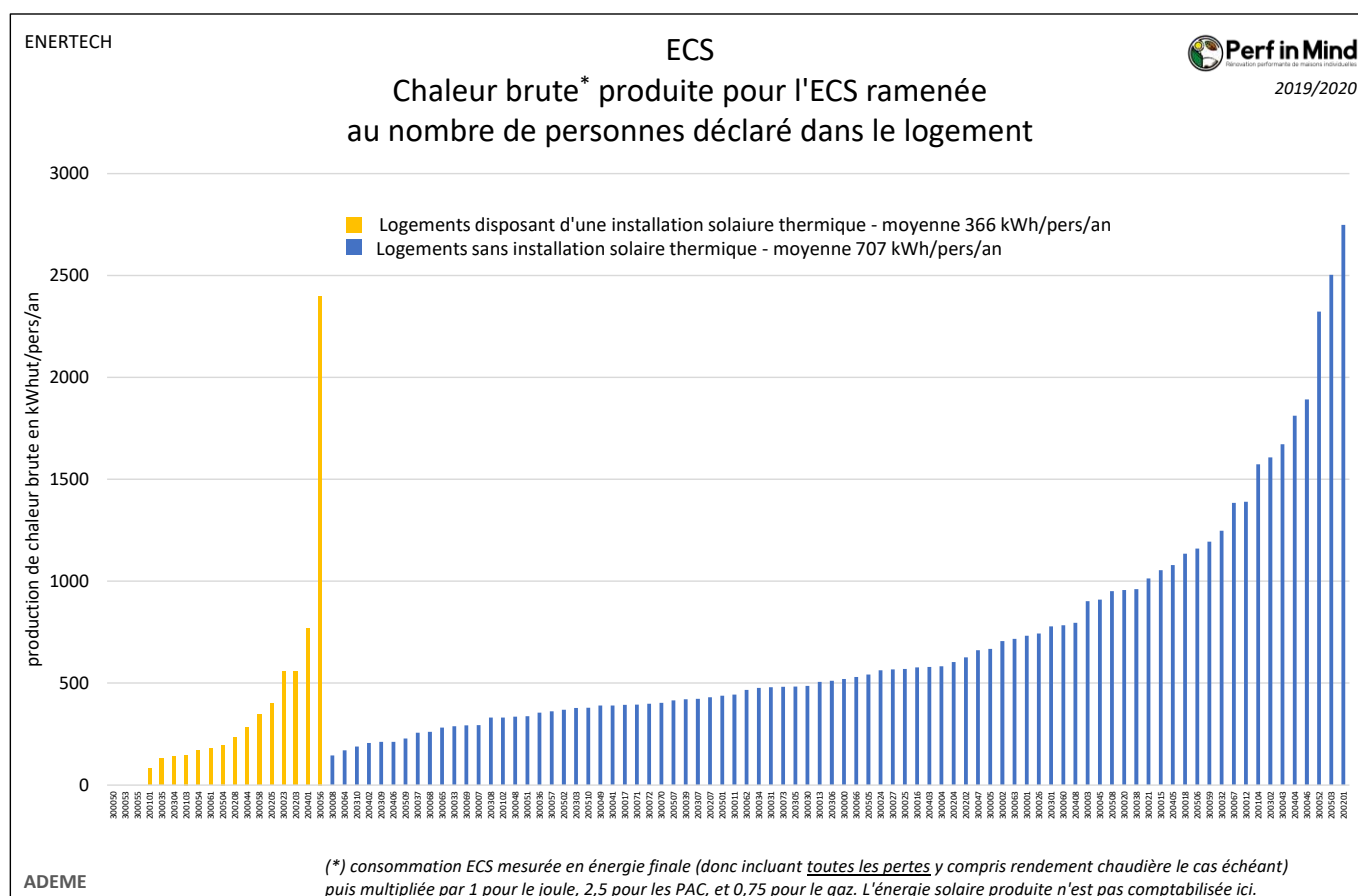
5.2.1 Influence du nombre de personnes sur la consommation d'ECS

Méthodologie :

Remarque importante : on parle dans ce paragraphe de « chaleur brute » produite par les générateurs ECS, incluant l'ensemble des pertes (pertes liées au rendement chaudière, au stockage, à la distribution etc.). En effet l'énergie ECS puisée n'est connue que sur un très faible nombre de logements.

L'ECS est un usage énergétique « individuel » qui croît assez logiquement avec le nombre de personnes dans un logement. On est donc tenté de tracer en première intention la consommation de chaleur ECS ramenée au nombre de personnes.

On constate pourtant (Figure 165) que la consommation par personne évolue, hors installations solaires, dans un rapport de ... 1 à 18 !



- Puisages importants comme les bains qui déséquilibrent le bilan ;
- Etc.

L'agglomération des consommations par *typologie* de foyers (1 pers ; 2 à 3 pers ; plus de 4 pers) présentée en Figure 166 permet de dégager une tendance à la hausse avec le nombre d'occupants.

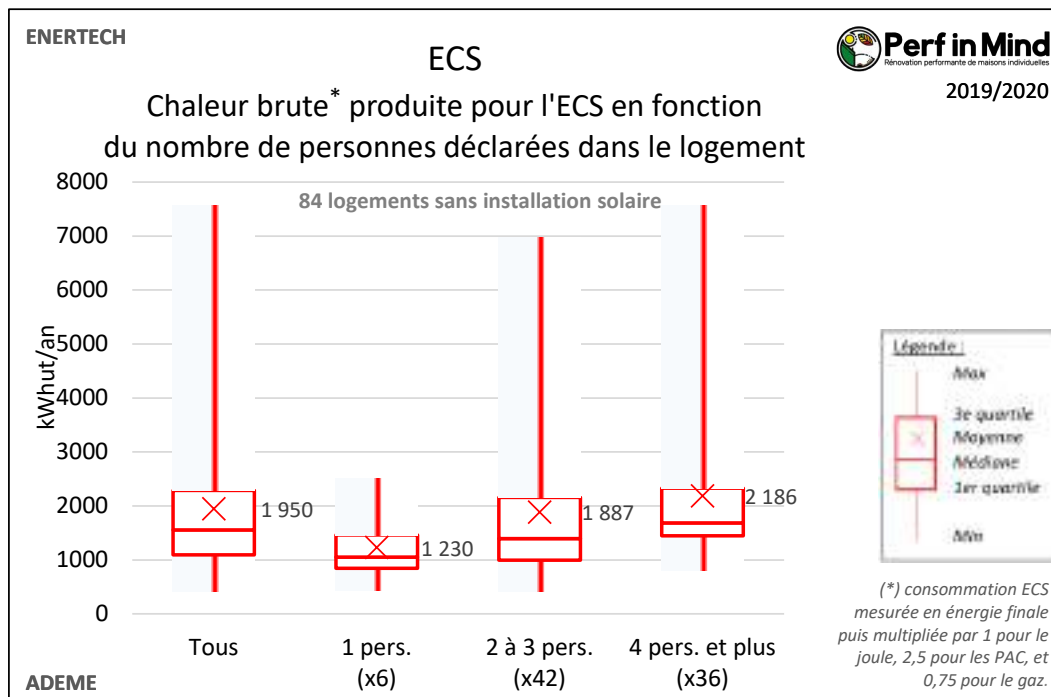


Figure 166 : Consommation de chaleur pour l'ECS par typologie de foyer.

Cette tendance « s'écrase » quelque peu lorsqu'on ramène la consommation à la surface des logements (Figure 167).

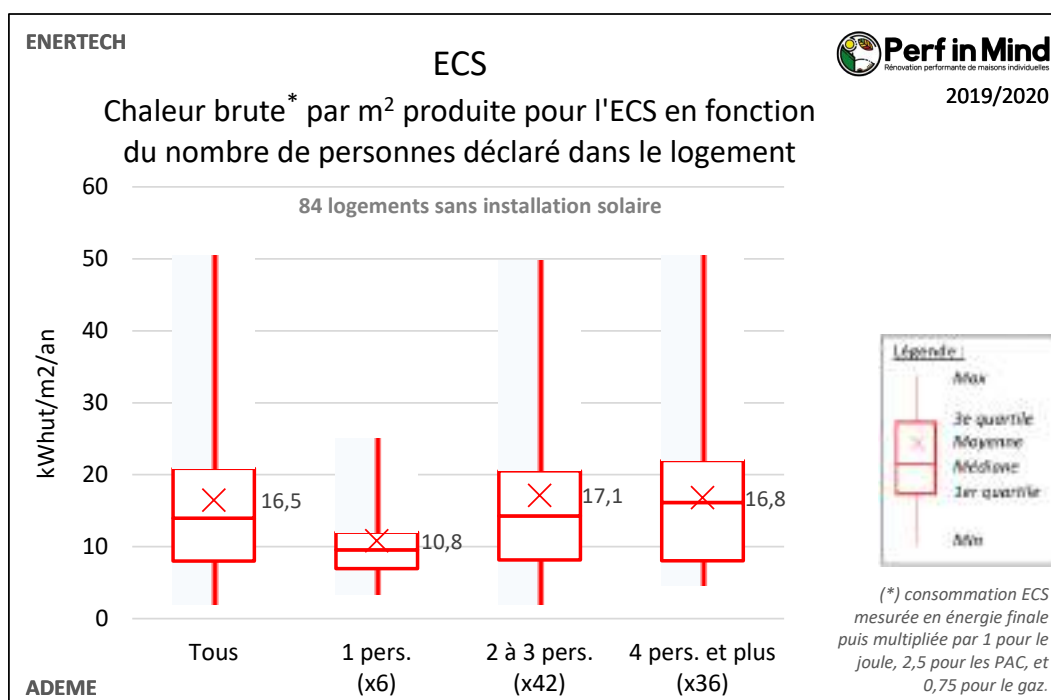


Figure 167 : Consommation de chaleur pour l'ECS par m² de surface shab.

Le nombre d'occupants est donc un indicateur qui fonctionne bien macroscopiquement pour quantifier la consommation d'ECS mais ne permet pas d'expliquer la variabilité spectaculaire que l'on observe au cas par cas.

5.2.2 Influence des débits aux points de puisages

Lors de l'instrumentation des maisons en suivi « avancé », nous avons mesuré les débits aux différents points de puisage.

Figure 168 ci-contre : Illustration de la mesure de débit aux points de puisage ECS avec un débitmètre (source Enertech, image d'archive).



Le résultat du décompte des points de puisage par logement et des débits moyens mesurés est présenté dans le graphique suivant :

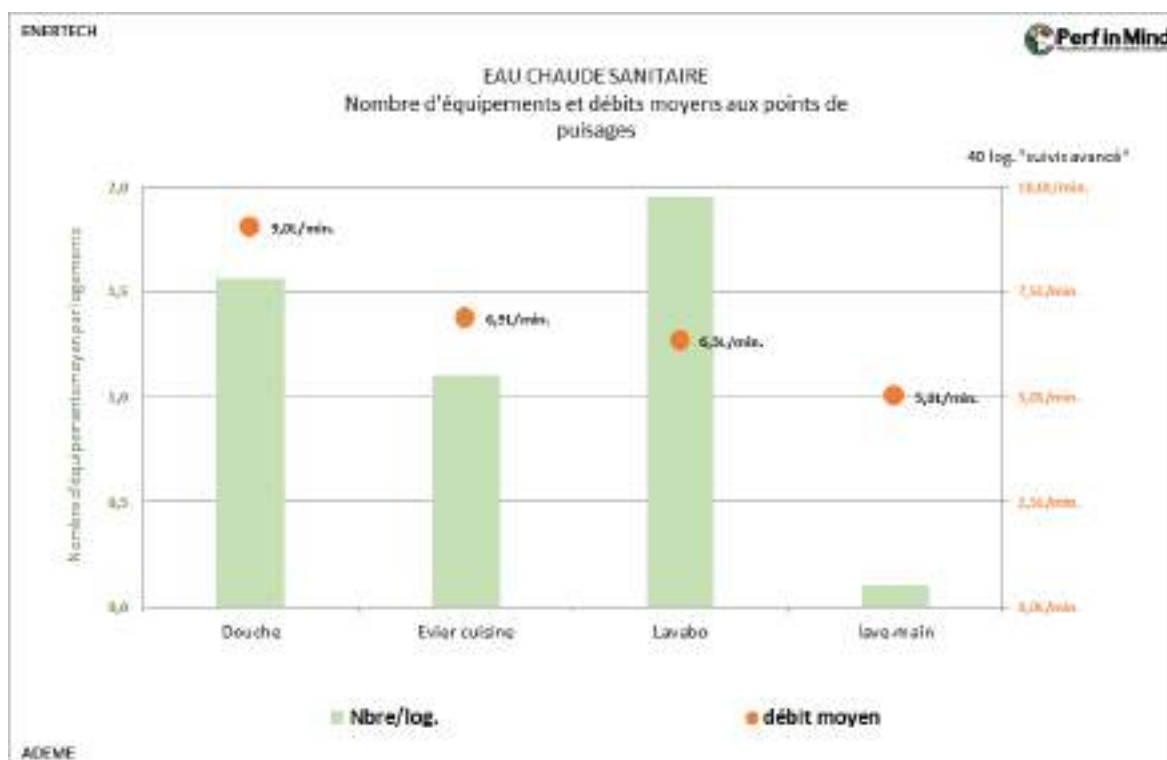


Figure 169 : Nombre et débit moyen par points de puisages

Cependant, la valeur moyenne par point de puisage reflète mal la dispersion des débits mesurés. Aussi, les résultats détaillés présentés en Figure 170 sont assez spectaculaire dans leur étendue :

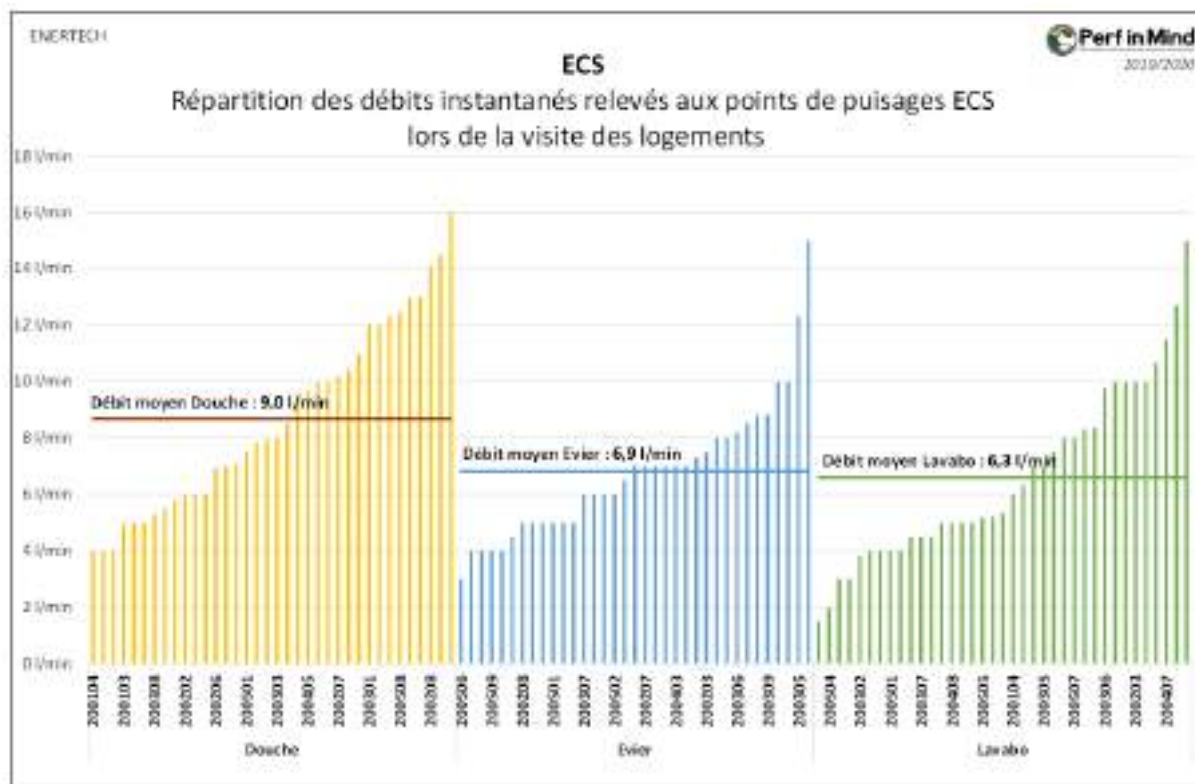


Figure 170 : Débits instantanés relevés aux points de puisages ECS dans les logements avancés.

Les statistiques par usages sont les suivantes :

- **Douches** : débit moyen **9,0 L/min** avec une étendue de **4 à 16 L/min** !
- **Eviers** : débit moyen **6,9 L/min** avec une étendue de **3 à 15 L/min** !
- **Lavabos** : débit **moyen 6,3 L/min** avec une étendue de **2 à 15 L/min** !

Il est clair que l'impact de ces résultats sur les consommations dépendra des points de puisages les plus sollicités ainsi que des profils d'usages (c'est-à-dire essentiellement les *durées* de puisages).

Mais on comprend tout de suite à lecture de ces résultats qu'il est difficile, quand on rentre dans le détail de la mesure, de parler d'une *consommation standard* d'ECS par personne !

On note que les débits minimaux correspondent à de bonnes pratiques en matière **d'équipements hydro-économiques**. Il a en effet été montré sur le **projet ECSpsect**⁹ que la limitation des débits à 6 L/min aux pommeaux de douche, 5 L/min en cuisine et 2,5 L/min aux lavabos était bien tolérée par les usagers et permettait une **réduction (mesurée) de l'énergie puisée de 20% en moyenne** sur un échantillon de 15 logements.

NB : aucune corrélation nette n'a pu être établie entre les consommations brutes de chaleur ECS et une somme pondérée (arbitraire) des débits instantanés. Cette absence de corrélation signifie seulement que

⁹ Campagne de mesure réalisé par Enertech avec le soutien de l'ADEME, rapport disponible prochainement (fin 2021).

l'on ne connaît pas assez bien le ratio d'utilisation de chaque point de puisage ainsi que la part des bains le cas échéant.

Pour conclure, une prise en compte plus systématique de la maîtrise des débits aux points de puisage, grâce à **l'installation de dispositifs hydro-économes calibrés, pourrait être intégrée à l'ensemble des dispositifs de rénovation** pour diminuer de facto les consommations d'ECS quel que soit le type d'approvisionnement énergétique envisagé.

5.2.3 Influence du ballon thermodynamique sur la consommation

On peut comparer les consommations des chauffe-eau thermodynamiques aux quelques ballons électriques présents, pour se donner une idée de leur fonctionnement. C'est ce qui est présenté dans le graphique suivant :

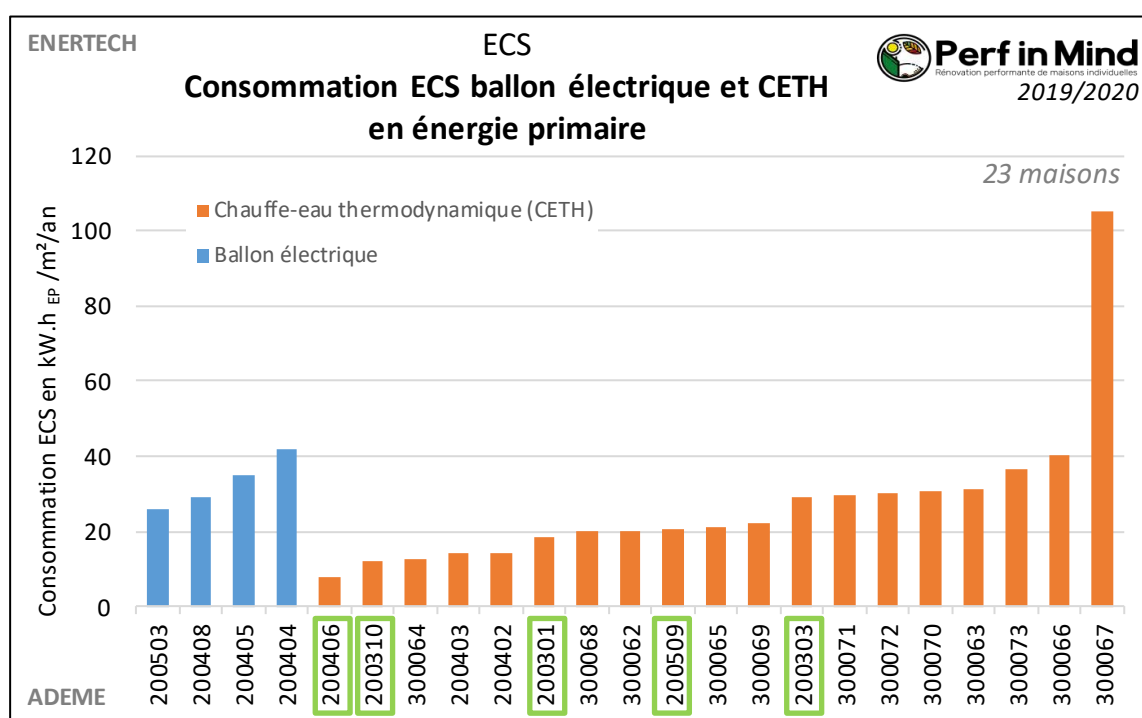


Figure 171 : Consommations d'ECS des projets équipés d'un ballon électrique et d'un chauffe-eau thermodynamique, en énergie primaire. Les numéros de logement encadrés en vert identifient ceux qui ont pu faire l'objet de l'analyse détaillée qui suit.

On note pour la plupart des ballons thermodynamiques une consommation plus faible que celle des ballons électriques. En supposant des puisages comparables, ceci semble indiquer que le COP de ces ballons permet d'abaisser significativement la consommation électrique.

On note cependant que pour d'autres maisons, la consommation des ballons thermodynamiques est comparable à celle de ballons électriques, voire dans un cas très supérieure. Ceci peut signifier soit des puisages ECS nettement plus élevés, soit un faible gain procuré par le système thermodynamique.

Il n'était pas prévu d'instrumenter en détail les ballons thermodynamiques. En particulier, il n'y a pas de compteur de chaleur sur les puisages, ce qui ne permet pas de mesurer le COP de ces équipements. Cependant pour certains suivis « avancés » (encadrés en vert dans le graphique précédent), la mesure au

pas de temps de 10min a permis de suivre les puissances appelées, et de différencier ainsi le fonctionnement du compresseur du ballon et celui de l'appoint électrique. Dans le tableau suivant, on a fait l'hypothèse que tous les appels de puissance supérieurs à 1 kW sont le fait non du compresseur mais celui de l'appoint. On peut ainsi en déduire la part de l'énergie consommée par le système thermodynamique et celle de l'appoint par effet Joule :

	Consommation ECS annualisée	Part de la résistance électrique
200406	527,5kWh/an	0,4%
200310	825,1kWh/an	24,5%
200509	950,4kWh/an	0,0%
200301	951,4kWh/an	0,1%
200303	1289,9kWh/an	71%
MOYENNE	908,9kWh/an	19%

Figure 172 : Tableau de consommations ECS et identification de la part de la consommation due à la résistance d'appoint.

Pour 3 des 5 logements concernés, l'appoint consomme moins de 1% de la consommation électrique. On peut donc supposer un bon fonctionnement du ballon thermodynamique, et un COP sans doute proche de 3.

Pour l'un des logements, l'appoint représente environ 25% de la consommation. Ceci dégrade le COP apparent : si on fait l'hypothèse d'un COP de 3 sans l'appoint, 25% d'appoint fait chuter le COP apparent à 2,5.

Pour le dernier, le plus consommateur des 5 logements étudiés ici en détail, l'appoint représente plus de 70% de la consommation électrique. Si on fait de même l'hypothèse d'un COP de 3 sans appoint, le COP apparent chute à 1,6. Ceci peut expliquer que cette installation a une consommation ECS peu différente d'une installation avec ballon électrique.

On peut supposer qu'une part importante des installations plus consommatrices que des ballons électriques dans la Figure 171 ont présenté ce type de contre-performance.

Le plus souvent, l'appoint des ballons thermodynamiques se déclenche lorsqu'on leur demande de produire de l'ECS à une température trop élevée par rapport à ce que leur compresseur peut fournir, soit généralement 45 à 48°C. Si on les règle à une consigne supérieure, le COP apparent se dégrade. Il est donc important de choisir ces systèmes en connaissance de cause et de les régler à une température la plus basse acceptable par le ménage.

On rappelle à ce sujet que la réglementation portant sur la légionelle¹⁰ ne fixe des règles que pour les ballons de 400 litres et plus. Indépendamment de la prudence nécessaire face au risque de légionelle, il est donc *légal* de régler un ballon thermodynamique à 45 ou 50°C de consigne.

¹⁰ Arrêté du 30 novembre 2005 : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000423756/>

5.2.4 Influence du solaire sur la consommation

Comme vu précédemment la **présence d'une installation solaire réduit très significativement la consommation d'ECS** ($-14,6 \text{ kW.h}_{\text{ep}}/\text{m}^2/\text{an}$ en moyenne) et constitue donc un paramètre d'influence très sensible sur la consommation.

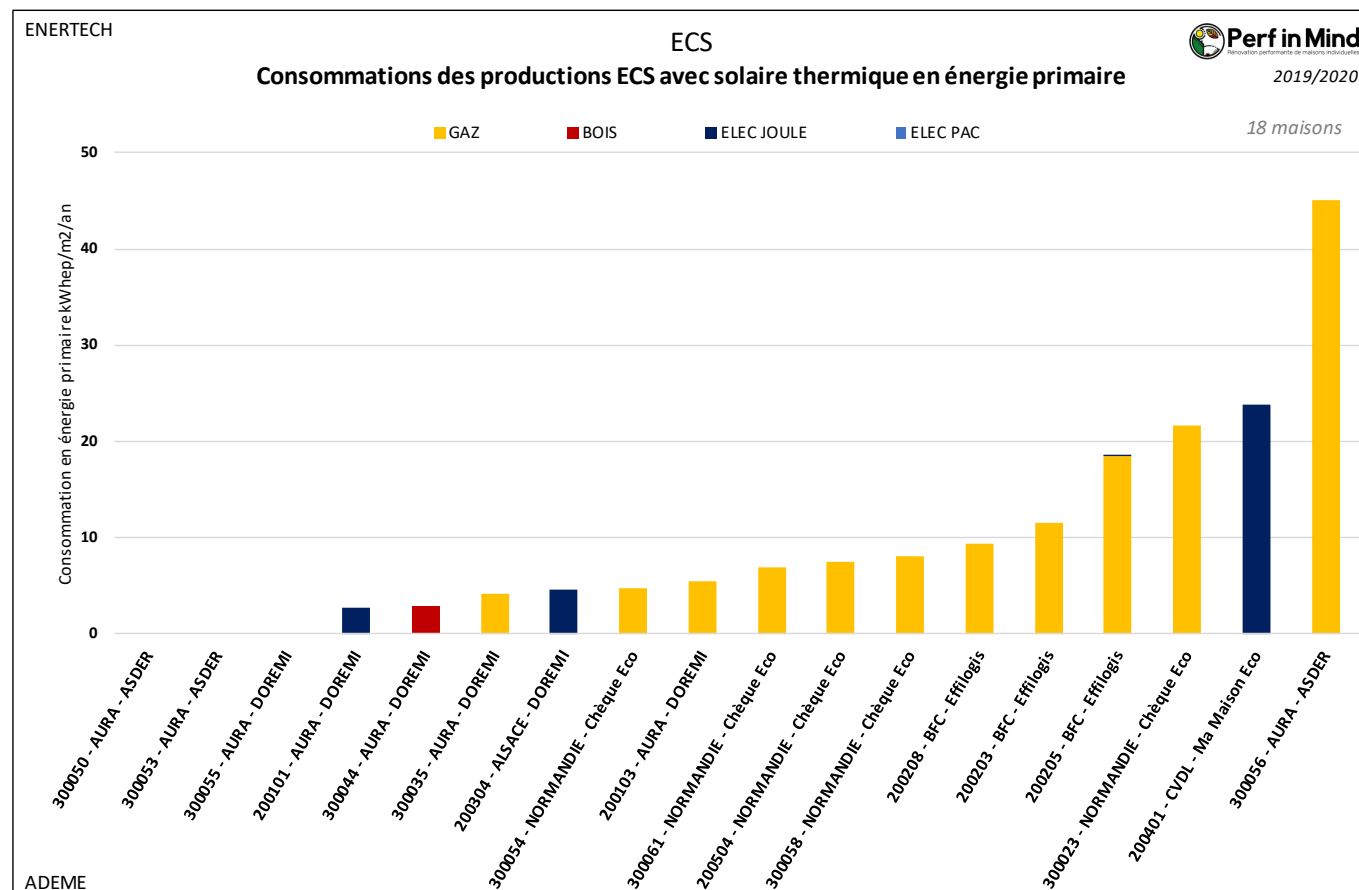


Figure 173 : Consommations d'ECS des projets équipés d'une installation solaire thermique en énergie primaire.

On note cependant de fortes disparités au sein des 18 projets : **une majorité d'entre eux (13 sur 18) présente une consommation d'ECS en énergie primaire inférieure à $10 \text{ kW.h}_{\text{ep}}/\text{m}^2/\text{an}$, voire nulle** pour trois d'entre eux. Ceci dénote un très bon fonctionnement de ces installations, et sans doute une certaine sobriété d'usage pour les consommations les plus faibles. On note que pour ces 13 logements que le choix d'un simple appoint électrique n'était pas pénalisant même dans ce bilan en énergie primaire.

A contrario, 4 projets sur 18 présentent une consommation proche ou supérieure à $20 \text{ kW.h}_{\text{ep}}/\text{m}^2/\text{an}$, **ce qui pourrait laisser entendre un dysfonctionnement** de l'installation solaire. La métrologie prévue sur ces logements n'a malheureusement pas permis d'identifier précisément la cause de ce que nous considérons a priori comme une contre-performance.

NB : en complément des ballons thermodynamiques et installations solaires décrites précédemment, d'autres solutions existent pour une production d'ECS avec une part renouvelable ou de récupération :

- *A notre connaissance, aucune rénovation n'a mis en œuvre de **récupérateur de chaleur sur les eaux grises**. Le principe en est de récupérer la chaleur des eaux usées du bac à douche, via un échangeur de chaleur qui préchauffe l'eau froide.*
- *Aucune **production ECS solaire photovoltaïque** (système Power Reducer) n'est présente sur les logements de l'échantillon Perf in Mind. Ce dispositif produisant de l'ECS au fil du soleil a été étudié récemment dans le cadre du projet ECSpect. Il constitue une alternative très intéressante de production d'ECS solaire lorsque l'on privilégie l'autoconsommation PV devant la vente totale. Son bilan en énergie primaire, son coût ainsi que son absence de maintenance en font un système très compétitif quand on le compare au solaire thermique.*

Globalement, pour plus d'informations sur l'ECS, nous invitons les lecteurs à consulter **l'étude ECSpect**¹¹.

¹¹ ¹¹ Campagne de mesure réalisé par Enertech avec le soutien de l'ADEME, rapport disponible prochainement (fin 2021).

6 Usages électriques

Méthodologie :

Le suivi des usages électriques n'a été possible que dans les maisons en suivi « avancé », dans lesquels l'instrumentation prévoyait la pose de pinces ampèremétriques dans les tableaux électriques des logements.

Différents usages ont été suivis, permettant ad minima de distinguer la consommation de la ventilation et celle des auxiliaires de chauffage.

Figure 174 ci-contre : Illustration de la pose de pinces ampèremétriques dans le tableau électrique d'une maison.



6.1 Ventilation

6.1.1 Puissance électrique

La puissance électrique appelée par la ventilation a été suivie en permanence au cours de l'année dans les 38 logements en suivi « avancé ». Sur la Figure 175 ont été relevées les puissances à la pose et à la dépose des capteurs.

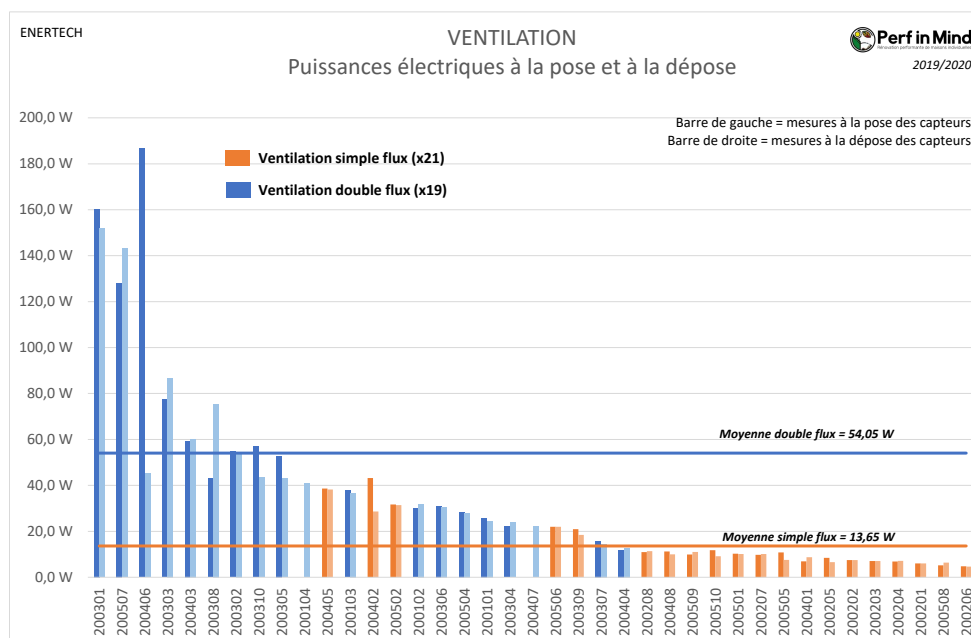


Figure 175 : Ventilation – Puissances électriques mesurées à la pose et à la dépose

La puissance moyenne tous types de ventilation comprises est de 34,9 W.

Si l'on distingue par type de ventilation :

- Simple flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 4,7W, 13,65 W et 38,4W ;
- Double flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 11W, 53,5W et 156W.

Les logements 200301 et 200507 présentent les puissances les plus élevées de ventilation. Pour le premier il s'agit d'un problème de longueur de réseau et d'entretien des filtres (cf. Figure 177). Pour le 200507 il s'agit d'un taux de renouvellement d'air très élevé : 0,81 vol/h (150 m³/h pour 73 m² !).

En moyenne la puissance appelée par les ventilations double flux est 4 fois plus importante que celle des ventilations simple flux. Ce constat est étonnant car en théorie un caisson double flux devrait avoir une puissance appelée environ 2 fois supérieure du fait de la présence de 2 moteurs mais également de filtres et d'un échangeur de chaleur. **L'explication de cet écart vient du fait que les débits sont supérieurs en double flux** (133 m³/h en moyenne en double flux contre 80 m³/h en simple flux, voir §3.1.3). Ainsi en raisonnant en termes de puissance débitique (puissance par unité de débit), la valeur des caissons double flux est seulement 2,35 fois supérieure (0,47 W/m³.h⁻¹) à celle des simple flux (0,20 W/m³.h⁻¹) comme le montre la Figure 176.

Puissance débitique selon le type de ventilation :

- Simple flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 0,06 W/m³.h⁻¹, 0,20 W/m³.h⁻¹ et 0,96 W/m³.h⁻¹ ; On note que la valeur maximale correspond à la ventilation par insufflation, qui est équipée d'un filtre. La valeur maximale hors VMI est de 0,6 W/m³.h⁻¹ ce qui reste très élevé.
- Double flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 0,18 W/m³.h⁻¹, 0,47 W/m³.h⁻¹ et 1,64 W/m³.h⁻¹.

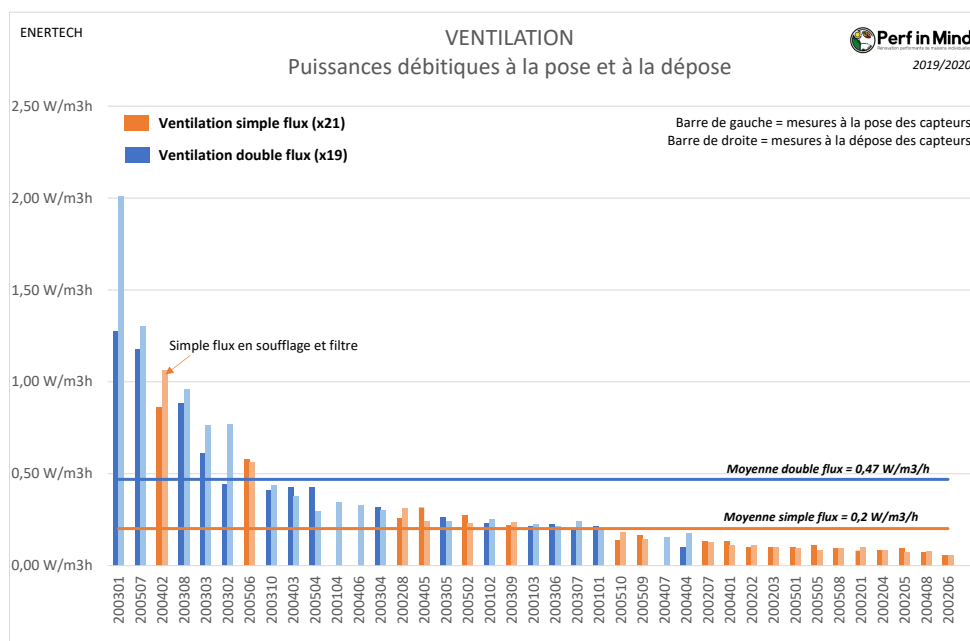


Figure 176 : Ventilation – Puissances débitiques mesurées à la pose et à la dépose

La ventilation double flux du logement 200404 présente une faible puissance débitique ($0,18 \text{ W/m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Pour ce logement les débits mesurés sont faibles avec $70 \text{ m}^3/\text{h}$, or les pertes de charges évoluent au carré du débit, et la puissance électrique évolue au cube du débit. Cette faible puissance s'explique donc par un débit anormalement bas.

Le caisson de ventilation du logement 200301 présente des débits de $126 \text{ m}^3/\text{h}$ à la pose et $76 \text{ m}^3/\text{h}$ à la dépose. Pourtant les performances du caisson sont mauvaises avec $1,27 \text{ W/m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à la pose et même $2,01 \text{ W/m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à la dépose. Dans ce logement les longueurs de réseaux sont très importantes et l'entretien des filtres très peu réalisé (cf. Figure 177), ce qui explique cette consommation excessive.



Figure 177 : Filtres à la pose (gauche) et à la dépose (droite).

L'entretien régulier, la bonne conception du réseau et le caisson de bonne qualité des logements 200101, 200307, 200306 et 200103 **en font des références** avec une puissance débitique autour de $0,2 \text{ W/m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Malgré les résultats constatés qui sont relativement mauvais, nous avons pu expliquer les contre-performances et mettre en évidence de bonnes pratiques. Une des conclusions émergeant de ces observations est qu'il **est possible d'installer des ventilations double flux qui ont une puissance débitique proche de celle des simple flux** (dans l'échantillon 6 caissons ont des valeurs débitique inférieure à $0,22 \text{ W/m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Pour cela il est nécessaire :

- D'avoir un **bon dimensionnement** des caissons. Il est recommandé de surdimensionner légèrement les VMC double flux, par exemple que le caisson soit capable d'assurer 50% de plus que le débit de base voulu. En effet plus le caisson accepte des débits élevés moins il génère de pertes de charge au débit voulu ;
- D'avoir des **réseaux avec de faibles pertes de charge** (sachant que les pertes de charges évoluent au carré du débit, la puissance électrique évolue au cube du débit). Il est notamment possible d'auto-équilibrer les réseaux de ventilation, ce qui permet d'éviter la perte de charge de plus de

50 Pa des bouches autoréglables ou modules de régulation. Cet auto-équilibrage permet dans certains cas de diviser par deux la puissance électrique de la ventilation.

- De **régler les ventilateurs au bon débit total et équilibrer les débits** entre les pièces lors de la mise en service de la ventilation.
- De **remplacer régulièrement les filtres** (généralement 2 à 3 fois par an).

6.1.2 Consommation électrique

La consommation électrique annuelle moyenne toutes ventilations confondues est de 278 kW.h/an.

Si l'on distingue par type de ventilation :

- Simple flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 27 kW.h/an, 116 kW.h/an et 329 kW.h/an ;
- Double flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 135 kW.h/an, 448 kW.h/an et 1294 kW.h/an.

Sachant que très peu de logements coupent leur ventilation (3 simple flux et 1 double flux sont coupées pendant environ 1 mois en été), le classement entre puissance appelée et consommation est quasiment le même.

Les logements 200301 et 200507 présentent des consommations extrêmement élevées à cause de puissance élevée (longueur de réseau, problème d'entretien des filtres et débit trop important).

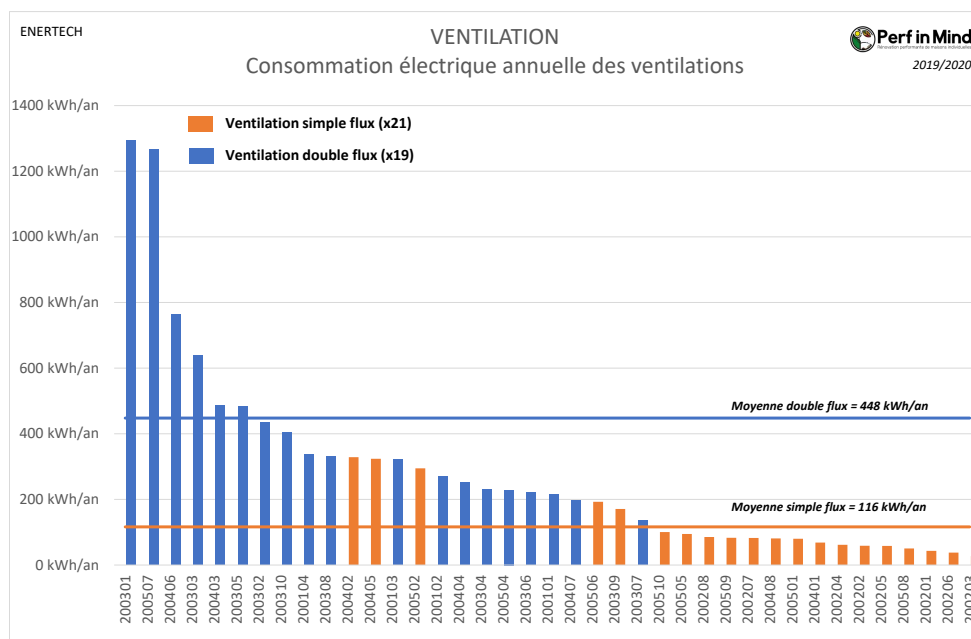


Figure 178 : Ventilation – Consommation électrique annuelle des ventilations.

Rapportée à la surface habitable, la consommation électrique surfacique annuelle moyenne toutes ventilations confondues est de 2,17 kW.h/an/m².

Si l'on distingue les typologies de ventilation :

- Simple flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 0,21 kW.h/an/m², 0,92 kW.h/an/m² et 2,25 kW.h/an/m² ;
- Double flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 1,34 kW.h/an/m², 3,5 kW.h/an/m² et 17,35 kW.h/an/m². Cette valeur maximale est liée à un débit beaucoup trop important. Le maximum suivant est légèrement inférieur à 6 kW.h/an/m².

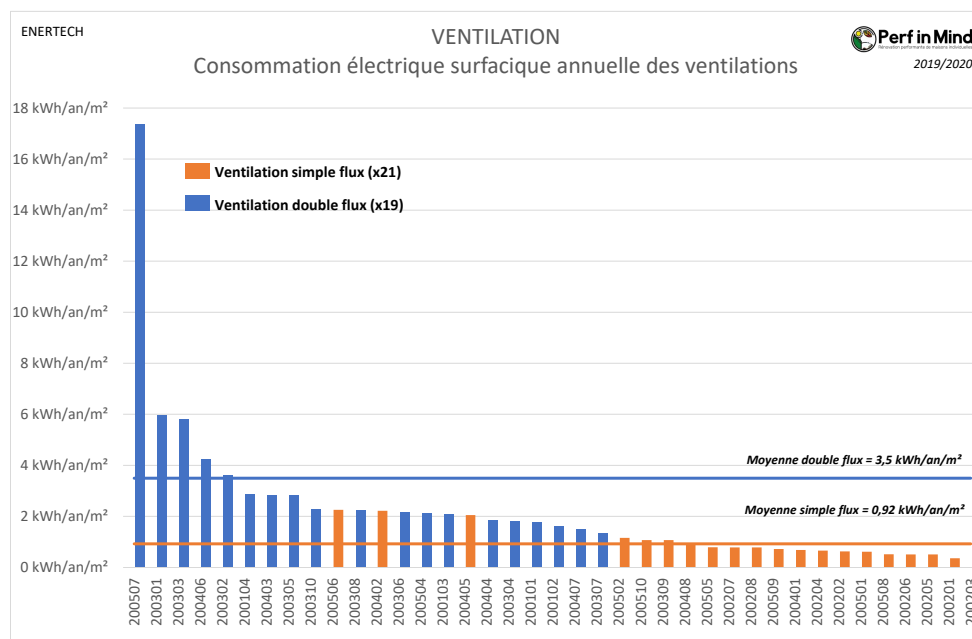


Figure 179 : Ventilation – Consommation surfacique électrique annuelle des ventilations.

La consommation surfacique de la ventilation double flux du logement 200507 est un record absolu de par sa puissance élevée et le très important taux de renouvellement d'air (0,81 vol/h).

6.1.3 Bilan énergétique de la ventilation : chauffage et consommation électrique

❖ Pertes thermiques par renouvellement d'air

Méthodologie : pour le calcul des pertes thermiques liée à la ventilation, ont été pris en compte pour les 38 maisons du suivi « avancé » :

- La moyenne des débits à la pose et à la dépose ;
- La température ambiante mesurée dans les logements ;
- La température extérieure des stations météorologiques les plus proches ;
- L'efficacité de récupération en chaleur pour les ventilations double flux (efficacité en température pondérée de l'écart de débit entre soufflage et extraction)

Le modèle de calcul utilisé est l'outil « besoin simple » décrit au [§4.3](#).

La part du besoin de chauffage lié à la ventilation est en moyenne 9,4 kW.h_{EU}/an/m² (EU pour énergie utile, soit ici le besoin de chauffage). Si l'on distingue les types de ventilation, la valeur moyenne de besoin

de chauffage lié à la ventilation est de $3 \text{ kW.h}_{\text{EU}}/\text{an}/\text{m}^2$ en double flux contre $15 \text{ kW.h}_{\text{EU}}/\text{an}/\text{m}^2$ en simple flux, soit **$12 \text{ kW.h}_{\text{EU}}/\text{an}/\text{m}^2$ d'écart**. A noter que cette valeur est du même ordre que l'écart théorique calculé au §4.3, sous-paragraphe [Enseignements de l'approche calculatoire](#), entre ventilation double flux et ventilation hygroréglable.

Si l'on applique les rendements des générateurs de chauffage et les coefficients conventionnels d'énergie primaire, la valeur moyenne de consommation de chauffage lié à la ventilation est de $10,2 \text{ kW.h}_{\text{EP}}/\text{an}/\text{m}^2$ d'énergie primaire, tous types de ventilation confondus. En différenciant les types de ventilation, la moyenne de consommation de chauffage liée à la ventilation est de $3,5 \text{ kW.h}_{\text{EP}}/\text{an}/\text{m}^2$ en double flux contre $16,4 \text{ kW.h}_{\text{EP}}/\text{an}/\text{m}^2$ en simple flux, soit **$13 \text{ kW.h}_{\text{EP}}/\text{an}/\text{m}^2$ d'écart**.

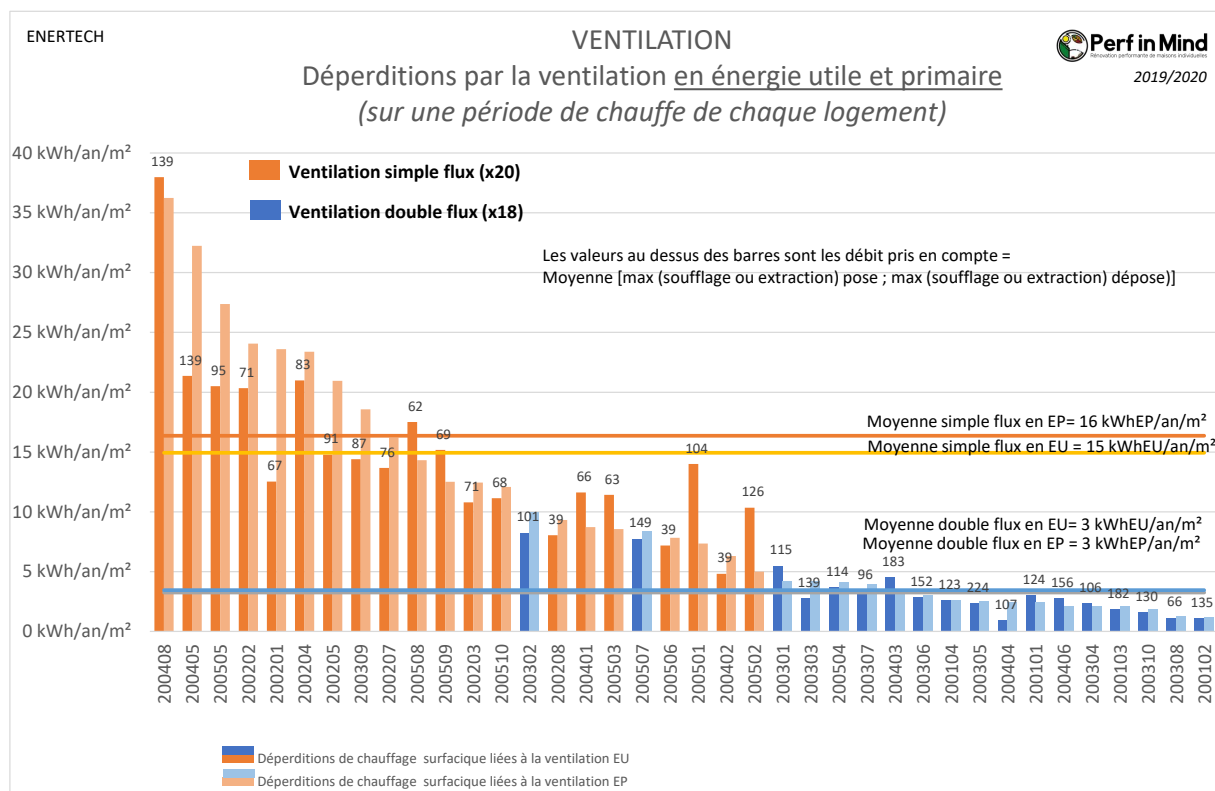


Figure 180 : Ventilation – Besoin de chauffage en énergie utile et consommation de chauffage en énergie primaire causés par la ventilation.

Il est intéressant de comparer les 2 logements avec les consommations les plus élevées car ils ont le même débit de ventilation ($139 \text{ m}^3/\text{h}$), le 200408 a cependant un taux de renouvellement d'air de $0,62 \text{ vol/h}$ contre $0,35 \text{ vol/h}$ pour le 200405. Rapporté au m^2 SHAB le logement 200408 a ainsi une consommation surfacique plus élevée. En énergie primaire l'écart se réduit car le chauffage du logement 200408 est au bois (coefficient d'énergie primaire de $0,6$) alors que celui du logement 200405 est au gaz de ville (coefficient d'énergie primaire de 1).

Globalement, en plus du débit, le taux de renouvellement d'air et la température ambiante mesurée jouent un rôle important dans ces résultats.

❖ Bilan total en énergie primaire

Sans surprise, la consommation de chauffage liée à la ventilation est bien plus faible en ventilation double flux qu'en simple flux. Cependant, on peut se demander si la consommation électrique des ventilateurs qui est supérieure en double flux ne vient pas annuler ce gain énergétique.

C'est pourquoi nous traitons dans ce paragraphe du bilan total en énergie primaire des ventilations :

Consommation de chauffage liées à la ventilation + Consommation électrique des ventilateurs

La consommation annuelle moyenne en énergie primaire liées à la ventilation est ainsi de 16,07 kW.h_{EP}/an/m² toutes ventilations confondues. Si l'on distingue par type de ventilation :

- En simple flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 8,0 kW.h_{EP}/an/m², 19,2 kW.h_{EP}/an/m², et 38,6 kW.h_{EP}/an/m² ;
- En double flux les valeurs minimale, moyenne et maximale sont respectivement de 5,4 kW.h_{EP}/an/m², 12,8 kW.h_{EP}/an/m², et 53,2 kW.h_{EP}/an/m².

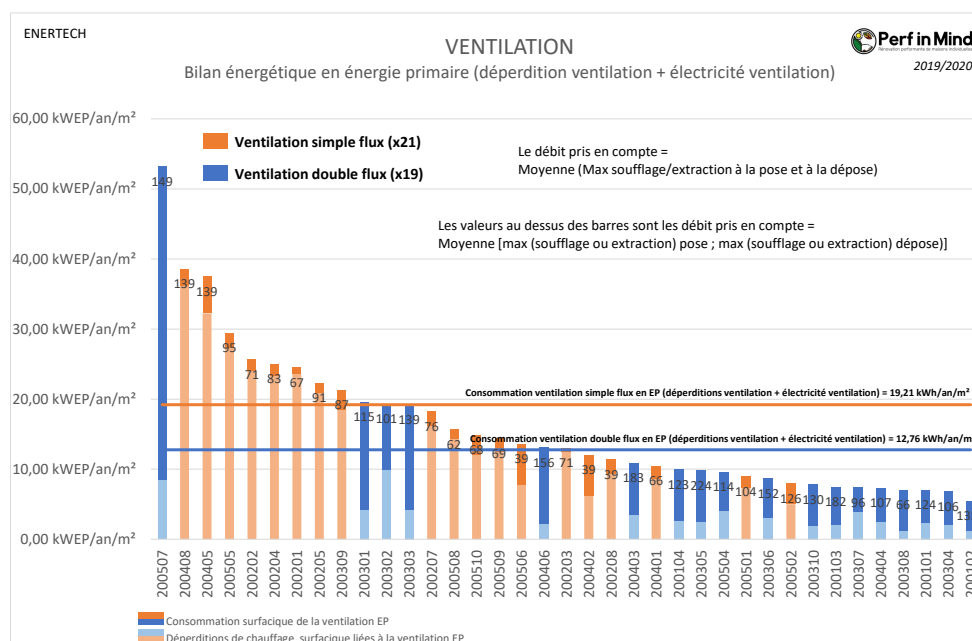


Figure 181 : Ventilation - Bilan énergétique en énergie primaire (déperdition ventilation + électricité ventilation)

En moyenne le bilan de consommation (chauffage + consommation électrique) **des ventilations double flux en énergie primaire est donc meilleur de 6,4 kW.h_{EP}/an/m², soit 1,5 fois plus faible** que celui des ventilation simple flux.

Ainsi, même avec les non-conformités de débits en simple flux comme en double flux, et certains cas de défaut d'entretien des filtres, **le gain énergétique de la ventilation double flux reste avéré.**

6.2 Auxiliaires de chauffage

Par auxiliaires on entend les pompes, actionneurs et divers éléments de régulation qui sont nécessaires au fonctionnement des systèmes de chauffages, chaudières, PAC, poêles à granulés etc.

La consommation électrique des auxiliaires de chauffage a été suivie dans 29 maisons sur les 38 du suivi « avancé ». Ces auxiliaires concernent :

- 23 auxiliaires de chaudière gaz ;
- 4 poêles à granulés ;
- 4 chauffe-eaux solaires individuels (CESI).

A noter que 2 installations cumulent un CESI et une chaudière gaz.

La consommation électrique (en énergie finale) des auxiliaires suivis est présentée dans le graphique suivant :

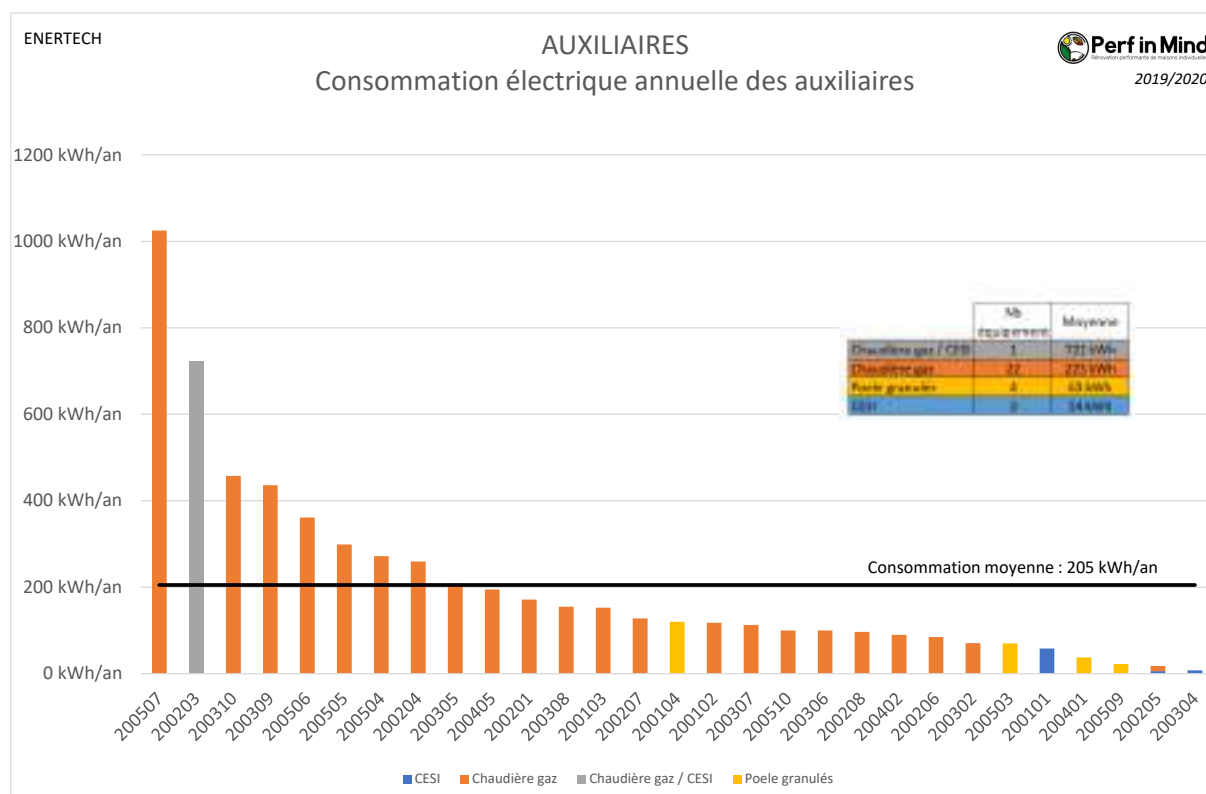


Figure 182 : Graphique des consommations électriques annuelles des auxiliaires de chauffage en énergie finale.

La consommation moyenne de ces auxiliaires est de 205 kW.h_{ef}/an. Elles varient cependant de plus de 1000 kW.h_{ef}/an à moins de 10 kW.h_{ef}/an. Le tableau inclus dans le graphique présente la moyenne par type d'auxiliaire.

Si l'on rapporte ces données à la surface habitable des maisons, la consommation moyenne des auxiliaires est de 1,9 kW.h_{ef}/m²/an, soit 5 kW.h_{ep}/m²/an d'énergie primaire (avec le coefficient 2,58). Le tableau suivant détaille les valeurs moyennes par type d'auxiliaire.

	Nb équipement	Moyenne
Chaudière gaz / CEST	1	5,6 kWh/an/m ²
Chaudière gaz	22	2,2 kWh/an/m ²
Poêle granulés	4	0,6 kWh/an/m ²
CEST	3	0,2 kWh/an/m ²

Figure 183 : Tableau des consommations surfaciques annuelles des auxiliaires de chauffage en énergie finale.

La très grande variation des consommations des auxiliaires a attiré notre attention. Pour tenter d'expliquer une telle variation, nous avons analysé plus en détail les débits maximums mesurés (au compteur de chaleur du chauffage) et le nombre d'heure de fonctionnement des auxiliaires de chauffage, pour les 20 maisons où ces données étaient disponibles. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant, avec une échelle de couleur allant du vert pour les valeurs les plus faibles au rouge pour les valeurs les plus élevées :

N° logement	Débit max 1% du temps	Débit max surfacique 1% du temps	Nb heure fonctionnement pendant la période de chauffe	Nb heure fonctionnement annuel	% du temps de la saison de chauffe
200102	897 l/heure	5 l/heure/m ²	1889 heures	1889 heures	32%
200103	1083 l/heure	7 l/heure/m ²	1266 heures	1266 heures	30%
200201	749 l/heure	6 l/heure/m ²	655 heures	1121 heures	8%
200202	665 l/heure	7 l/heure/m ²	505 heures	639 heures	12%
200203	709 l/heure	5 l/heure/m ²	4557 heures	5558 heures	55%
200204	1349 l/heure	14 l/heure/m ²	2552 heures	3018 heures	53%
200205	426 l/heure	4 l/heure/m ²	223 heures	874 heures	6%
200207	486 l/heure	5 l/heure/m ²	1806 heures	2365 heures	38%
200208	680 l/heure	6 l/heure/m ²	3176 heures	3946 heures	52%
200302	896 l/heure	7 l/heure/m ²	824 heures	915 heures	21%
200305	654 l/heure	4 l/heure/m ²	4069 heures	6038 heures	93%
200306	640 l/heure	6 l/heure/m ²	3915 heures	4991 heures	78%
200307	473 l/heure	5 l/heure/m ²	3240 heures	3892 heures	67%
200403	1403 l/heure	8 l/heure/m ²	3177 heures	3177 heures	50%
200501	1023 l/heure	8 l/heure/m ²	4338 heures	4446 heures	79%
200504	1082 l/heure	10 l/heure/m ²	5029 heures	5029 heures	74%
200505	817 l/heure	7 l/heure/m ²	3119 heures	3119 heures	61%
200506	594 l/heure	7 l/heure/m ²	5185 heures	5185 heures	71%
200507	1034 l/heure	14 l/heure/m ²	3201 heures	3235 heures	57%
200510	1139 l/heure	12 l/heure/m ²	1534 heures	1616 heures	36%

Figure 184 : Tableau des débits et durée de fonctionnement mesurés.

On note ici une forte dispersion des débits maximums, allant jusqu'à plus de 1000 l/h. A titre de comparaison, 1000 l/h avec un écart de température de 10°C entre aller et retour de chauffage (par exemple le régime 50/40°C) permet de transmettre une puissance de 12 kW. Or, comme nous l'avons vu au §2.7.2, les déperditions des maisons rénovées sont en moyenne inférieures à 6 kW. **Ces débits sont donc extrêmement élevés et résultent probablement de l'absence de réglage de la pompe du chauffage,** qui a été laissée à son débit maximum.

De même les heures de fonctionnement supérieure à 4000 heures sur l'année (qui compte 8760 heures) sont anormalement élevées. Elles signifient un fonctionnement permanent de la pompe en période de chauffe, voire également hors période de chauffe (sans doute une bascule manuelle du mode chauffage et ECS au mode ECS seule réalisée tardivement) ! **Visiblement, l'asservissement de la pompe au fonctionnement de la chaudière n'a pas été programmé**, alors qu'il est possible dans toute chaudière récente. C'est une économie d'énergie qui aurait pu être réalisée grâce à un simple réglage à réception.

Nous insistons donc de nouveau sur l'importance des réglages des installations de chauffage et d'ECS à la réception des travaux, que ce soit pour la programmation et la vérification du bon fonctionnement du thermostat, la loi d'eau (voir [§4.2.5](#)) et pour le réglage et l'asservissement des pompes.

6.3 Autres usages de l'électricité

Méthodologie :

Les « autres usages de l'électricité » désignent ici l'électricité spécifique (éclairage inclus) et la cuisson électrique.

Cette donnée a été mesurée sur une année complète, soit au tableau électrique pour les maisons en suivi « avancé », et soit par le relevé d'index mensuel fourni par les ménages ou le relevé d'index transmis par le compteur Linky pour les suivis « base ». Certains index manquants (au maximum 2 mois sur 12) ont été corrigés au ratio.



Figure 185 : Illustration – Exemple de compteur Linky.

L'échantillon ainsi suivi compte 87 maisons au total.

La consommation des autres usages de l'électricité est présentée en Figure 186 ci-dessous.

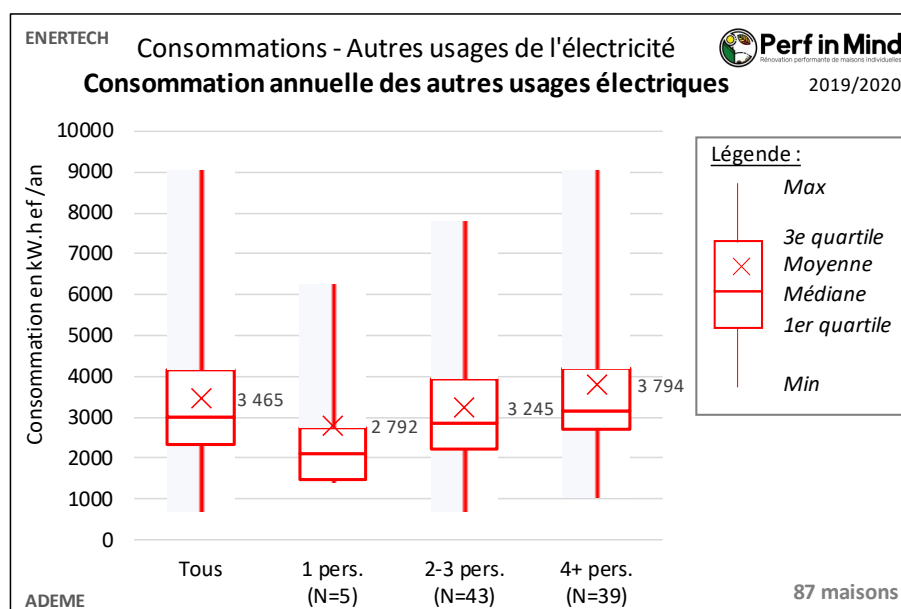


Figure 186 : Graphique « boîte à moustache » (voir le [Glossaire](#)) des consommations annuelles en énergie finale des autres usages de l'électricité, pour l'ensemble des 87 maisons où la mesure a été possible, et en différenciant par nombre d'habitants déclarés.

La moyenne générale des consommations des autres usages de l'électricité est de 3 465 kW.h_{ef}. Rapportée à la SHAB, cette consommation moyenne s'établit à **29,1 kW.h_{ef}/m²_{shab}**. Ce ratio peut être

comparé aux Aue du label E+C-, qui était fixé à $29 \text{ kW.h}_{\text{ef}}/\text{m}^2_{\text{shon}}$ pour les maisons, ce qui converti en SHAB (au ratio SHON/SHAB = 1,2) correspond à $34,8 \text{ kW.h}_{\text{ef}}/\text{m}^2_{\text{shab}}$. La consommation mesurée ici est donc inférieure au ratio du label E+C-.

En revanche, si on la compare aux résultats de l'étude *PANEL Elecdom*¹², qui établit la consommation d'électricité spécifique $2\,228 \text{ kW.h}_{\text{ef}}$ soit $25 \text{ kW.h}_{\text{ef}}/\text{m}^2_{\text{shab}}$, à laquelle on peut rajouter la consommation de la cuisson électrique de $299 \text{ kW.h}_{\text{ef}}$ on arrive à $2\,527 \text{ kW.h}_{\text{ef}}$ soit $28 \text{ kW.h}_{\text{ef}}/\text{m}^2_{\text{shab}}$. **Les consommations mesurées ici, en absolu ou en valeur surfacique, sont donc plutôt supérieure aux résultats de *PANEL Elecdom*.**

Sur l'ensemble des logements, on note une forte dispersion de ces usages, qui varient de 700 kW.h/an à 9000 kW.h/an , soit plus d'un facteur 10 ! Une partie de l'explication réside dans le nombre d'occupants des maisons. Si l'on classe les maisons par tranche de nombre d'habitants, on voit une certaine progression des statistiques de chaque échantillon. Attention cependant seules 5 maisons sont déclarées n'avoir qu'un habitant, ce qui rend cette statistique peu robuste.

La consommation moyenne évolue ainsi de 2800 kW.h/an pour les maisons habitées par 1 personnes, à 3250 kW.h/an pour les maisons habitées par 2 à 3 personnes, et 3800 kW.h/an pour les maisons habitées par 4 personnes et plus.

Dans tous les cas, on note une variation très importante maison par maison, le rapport max/min restant respectivement de 4, 11 et 9 pour les 3 tranches de peuplement des maisons.

Pour plus d'information sur les consommations d'électricités dans les logements, et leur décomposition par usages, nous invitons le lecteur à consulter le rapport *PANEL Elecdom*.

¹² Campagne de mesure réalisée par Enertech avec le soutien de l'ADEME et de RTE. Rapport complet et synthèse disponible sur <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4473-panel-usages-electrodomestiques.html>

7 Bilan énergétique global et comparaison aux objectifs

Dans ce chapitre, nous allons reprendre les résultats des chapitres 4, 5 et 6 en les combinant pour permettre la comparaison avec les objectifs des différents référentiels utilisés pour définir la performance des rénovations, ainsi qu'avec l'ancien DPE (celui en vigueur au moment de la conception de ces rénovations) et le nouveau DPE à titre informatif.

L'ordre de présentation est par périmètre croissant, comme le résume le schéma suivant :

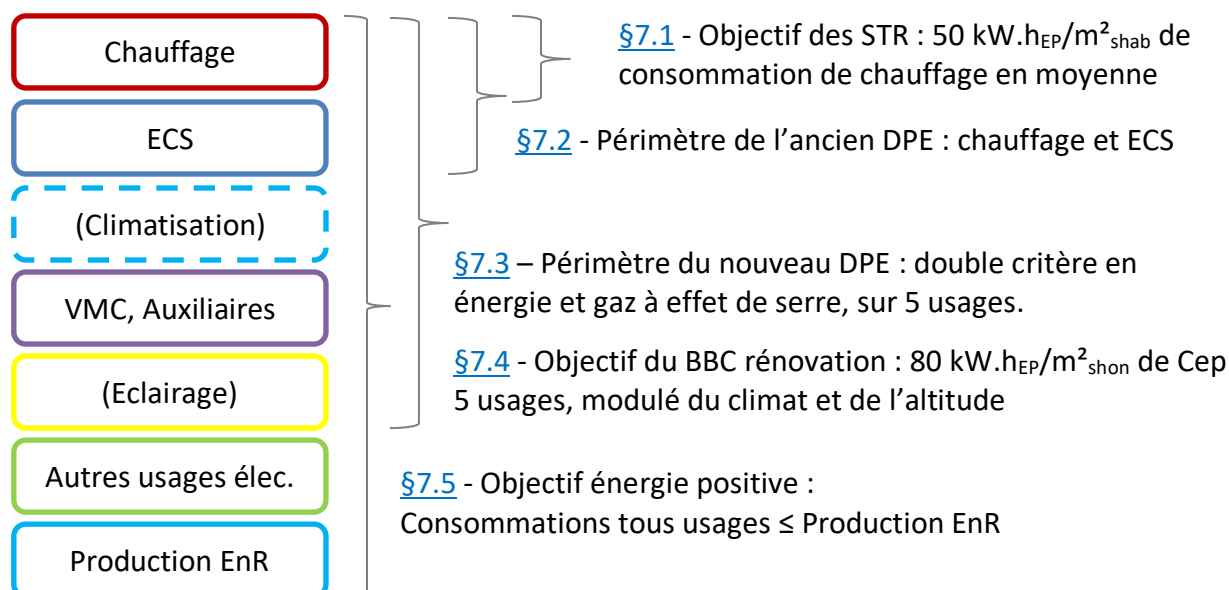


Figure 187 : Schéma des périmètres des différentes définitions de la performance des maisons rénovées.

7.1 Bilan en Consommation de chauffage et objectif des STR

Sur les 106 rénovations suivies, 32 ont été conçues avec les Solutions Techniques de Rénovations, bouquets de travaux précalculés, dont l'objectif est d'atteindre une **consommation de chauffage de $50 \text{ kW.h}/\text{m}^2_{SHAB}/\text{an}$ en moyenne nationale** (voir le §1.3.2).

Cet objectif est exprimé a priori en énergie finale, cependant les bouquets de travaux distinguent le cas du chauffage électrique direct (des bouquets plus exigeants sur l'enveloppe sont définis), prenant ainsi en compte le coefficient d'énergie primaire du chauffage électrique. Pour les autres modes de chauffage, le référentiel impose pour les pompes à chaleur un COP minimum de 3, soit une valeur supérieure au coefficient d'énergie primaire de l'électricité. Sous cette condition, les mêmes bouquets de travaux sont appliqués que l'on ait une PAC, une chaudière gaz, ou un poêle à bois. C'est donc en réalité un objectif de besoin de chauffage qui sous-tend la définition des STR.

Au final nous avons représenté ici les consommations de chauffage **en énergie primaire**. Nous avons appliqué ici les coefficients conventionnels du BBC rénovation, soit 2,58 pour l'électricité, 0,6 pour le bois et 1 pour les autres combustibles.

L'objectif national de $50 \text{ kW.h}/\text{m}^2_{SHAB}/\text{an}$ peut être décliné régionalement en appliquant par exemple les mêmes coefficients de modulation du climat et de l'altitude dits « a+b » que le calcul BBC.

Ces résultats et points de référence sont présentés dans le graphique suivant :

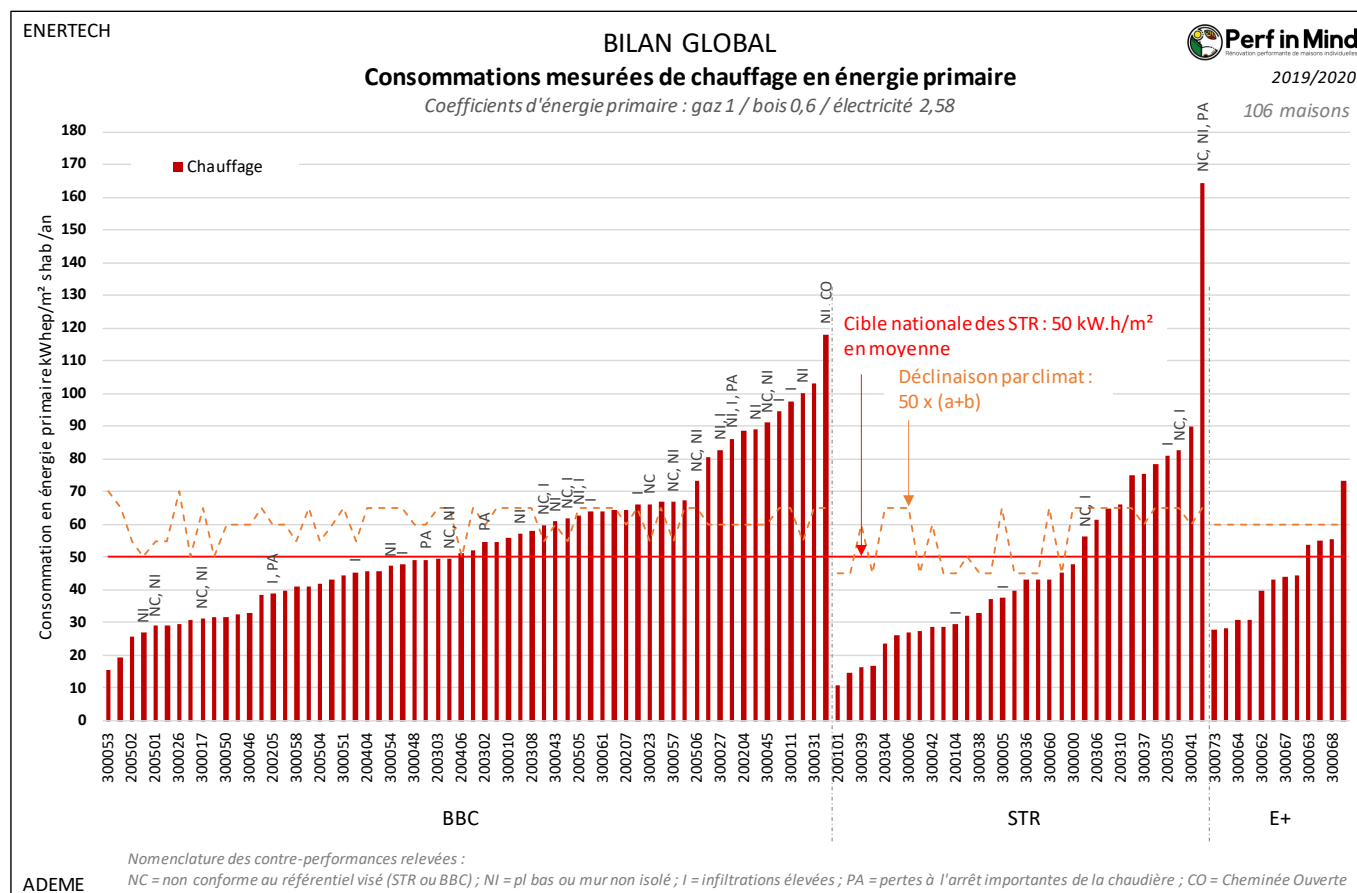


Figure 188 : Graphique des consommations de chauffage en énergie primaire. Comparaison aux objectifs des STR.

Dans l'analyse qui suit, nous nous concentrerons uniquement sur les 32 rénovations conçues avec les STR. On note que :

- La **consommation moyenne** de chauffage est de 48,3 kW.h_{EP}/m²_{SHAB}/an, ce qui **respecte l'objectif moyen national fixé** ;
- 21 rénovations (66%) respectent l'objectif moyen national de 50 kW.h/m²_{SHAB}/an. Parmi les 11 qui ne le respectent pas, 4 comportent des contre-performances, notamment la maison présentant la consommation maximale qui n'a en fait pas respecté le référentiel des STR.
- Si l'on module l'objectif selon le climat et l'altitude, 23 rénovations (72%) respectent l'objectif modulé. Parmi les 9 qui ne le respectent pas, 3 présentent des contre-performances.
- Si l'on se donne une marge de tolérance de 20% sur l'objectif modulé, **26 rénovations (81%) respectent l'objectif modulé avec marge de tolérance**. Si l'on exclut les 3 STR non conformes (code « NC » au sommet des barreaux), cette proportion atteint 86% (25 sur 29).

On peut conclure de cette analyse que les rénovations définies par les STR ont globalement très bien respecté l'objectif énergétique visé, avec plus de 80% de respect de l'objectif modulé avec une marge de tolérance de 20%.

Sur les autres dispositifs BBC et E+, 82% des maisons (61 sur 74) atteignent l'objectif des STR modulé avec la tolérance de 20%.

7.2 Bilan en Chauffage et ECS sur l'échelle de l'ancien DPE

Méthodologie :

Les valeurs présentées ici ne sont pas issues d'un calcul DPE, mais sont les consommations réelles mesurées, mises en forme et avec les conventions de calcul de l'ancien DPE (en vigueur jusqu'à l'été 2021).

Ainsi dans ce paragraphe (et uniquement dans celui-ci) le coefficient d'énergie primaire du bois est passé à 1 à des fins de cohérence avec le référentiel du DPE.

NB : des différences significatives peuvent exister avec le calcul DPE des logements concernés, en raison du caractère simplifié du calcul DPE et du fait que des hypothèses conventionnelles y sont prises en compte, qui peuvent différer de façon importante avec la réalité.

Nous nous intéressons ici à la performance mesurée des logements rénovés de Perf in Mind en regard des seuils énergétiques (A, B, C, ...) de l'ancienne étiquette énergie du DPE (celle en vigueur au moment de la conception de ces rénovations).

Les résultats sont présentés en Figure 189. On indique également sur ce graphique la « part ECS » dans le bilan total.

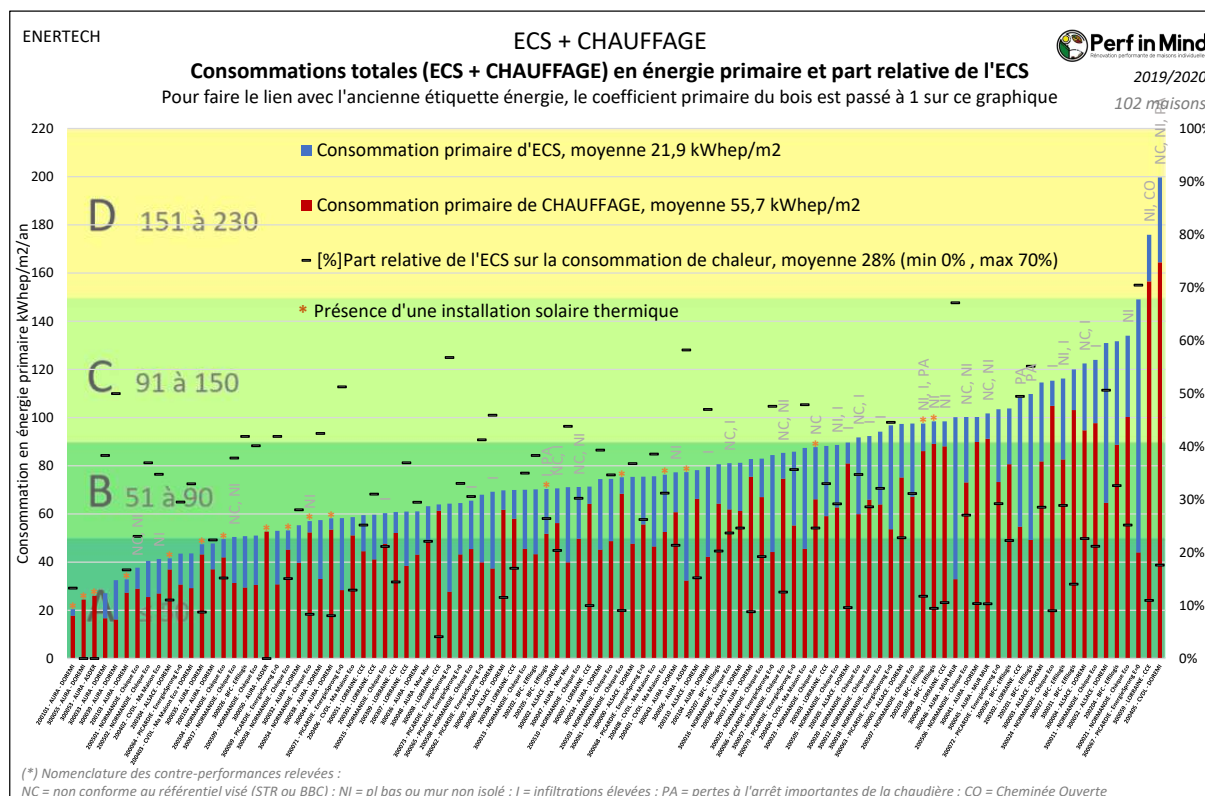


Figure 189 : Consommations totales « CHAUFFAGE + ECS » et comparaison aux seuils énergétiques de l'ancien DPE.

On en tire les observations suivantes :

- **70% des logements du projet sont en classe B ou A** (Figure 190 ci-dessous) ;

- Ce ratio monte à plus de 80% si l'on exclut les logements faisant l'objet d'une « contre-performance » constatée sur l'enveloppe ou le système de chauffage.

	Tous logements	Hors logement avec contre-performances décelées
Classe A	15%	19%
Classe B	55%	62%
Classe C	26%	18%
Classe D	2%	0%

Figure 190 : Tableau des mesures de Perf in Mind traduites sur l'échelle de l'ancien DPE.

Il est clair que la comparaison de la *mesure* aux seuils du DPE n'a pas tout son sens, particulièrement sur les consommations d'ECS qui constituent plus, du point de vue du DPE, un forfait fonction de la taille du logement auquel on agrège un coefficient d'énergie primaire.

Toutefois ces résultats nous montrent, sous une autre facette, que les performances atteintes *sur le terrain* par les logements rénovés dans le cadre de dispositifs performants n'ont rien ou pas beaucoup à envier aux *mesures* réalisées sur les logements neufs d'aujourd'hui.

Ce bon résultat nous incite donc à penser qu'il est à la fois urgent d'augmenter le nombre de logements rénovés en France mais également indispensable de maintenir un objectif de rénovation complète et performante type BBC ou bouquets de travaux type STR.

7.3 Bilan sur 5 usages sur l'échelle du nouveau DPE

Méthodologie :

Les valeurs présentées ici ne sont pas issues d'un calcul DPE, mais sont les consommations réelles mesurées, mises en forme et avec les conventions de calcul du nouveau DPE (en vigueur depuis l'été 2021).

Dans ce paragraphe (et uniquement dans celui-ci) le coefficient d'énergie primaire de l'électricité est passé à 2,3, celui du bois est à 1 en cohérence avec le référentiel du nouveau DPE. De même les coefficients d'émission de GES des énergies sont alignés sur ceux du nouveau DPE, soit ceux de la RE2020 (selon arrêté « méthode ») :

Energie	Coefficient d'énergie primaire	Coefficient de GES
Electricité – chauffage	2,3	79 g CO ₂ / kW.h
Electricité – ECS		65 g CO ₂ / kW.h
Electricité – éclairage		69 g CO ₂ / kW.h
Electricité – autres		64 g CO ₂ / kW.h
Gaz fossile (réseau)	1	227 g CO ₂ / kW.h
Bois granulés et bûches	1	30 g CO ₂ / kW.h

Figure 191 : Tableau des coefficients d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre (GES) utilisés dans la RE2020 et le nouveau DPE.

NB : des différences significatives peuvent exister avec le calcul DPE des logements concernés, en raison du caractère simplifié du calcul DPE et du fait que des hypothèses conventionnelles y sont prises en compte, qui peuvent différer de façon importante avec la réalité.

Le graphique suivant présente la performance mesurée des logements rénovés de Perf in Mind en regard des seuils énergétiques et climatique du nouveau DPE :

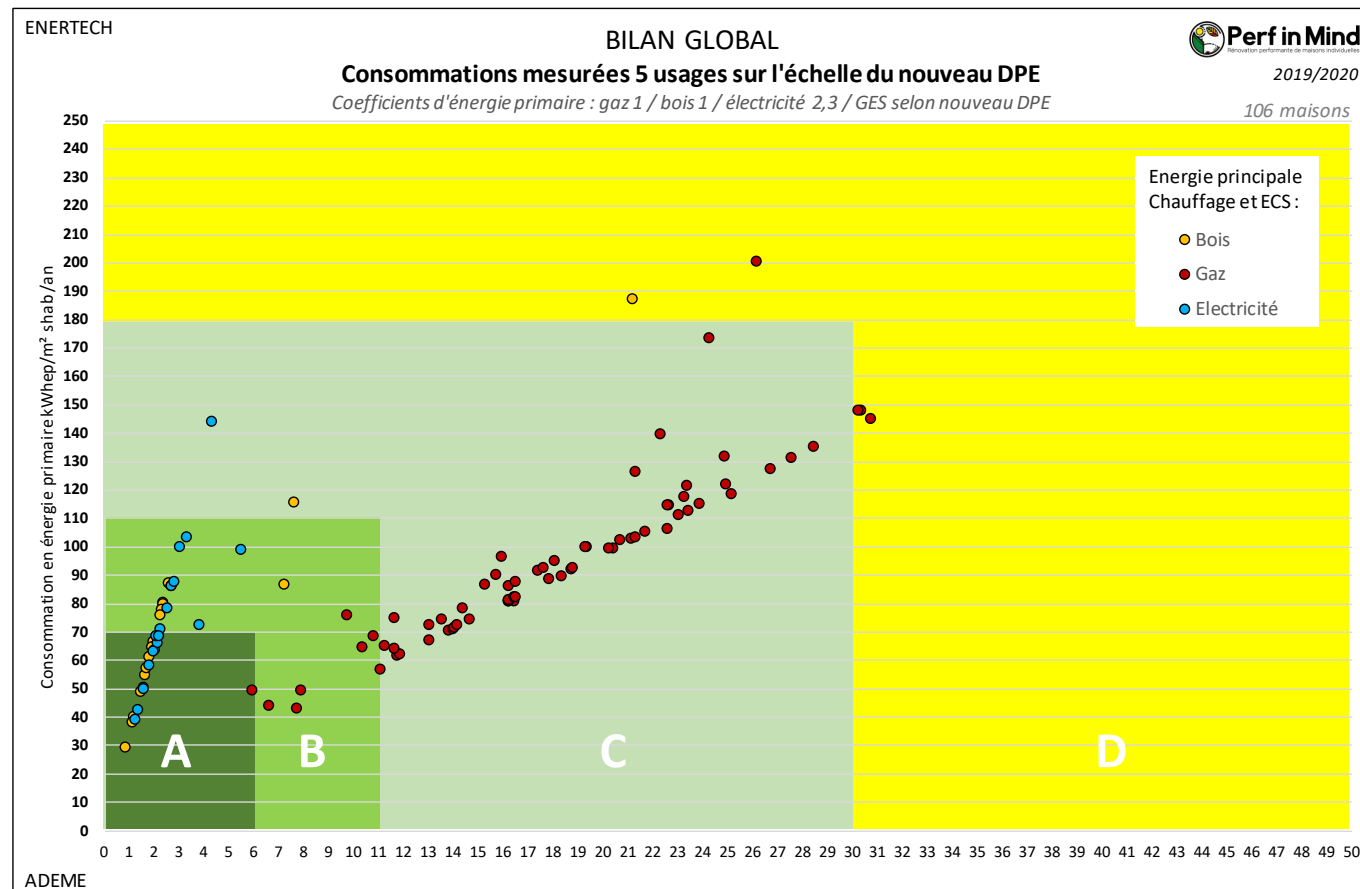


Figure 192 : Consommations mesurées de chauffage, ECS, auxiliaires (mesurés ou estimés) et éclairage (estimé, voir paragraphe suivant) et comparaison aux seuils énergétiques et GES du nouveau DPE. La couleur des marques indique l'énergie principale de chauffage et d'ECS.

On note que ce ne sont plus que 39% des rénovations qui atteignent la classe A et B. En effet, beaucoup des logements chauffés au gaz et respectant le critère énergétique de la classe B ne respectent pas le critère climatique, et passent en classe C. Ce sont au total 57% des logements qui se situent en classe C. 5% sont en classe D.

Le tableau suivant présente ces statistiques, en précisant également la part des maisons respectant uniquement le critère énergie primaire des différentes classes, ou uniquement le critère GES :

	Critère énergie primaire	Critère GES	Classe du nouveau DPE
Classe A	29%	33%	19%
Classe B	49%	8%	20%
Classe C	20%	57%	57%
Classe D	2%	3%	5%

Figure 193 : Tableau des mesures de Perf in Mind traduites sur l'échelle du nouveau DPE.

NB : on rappelle que cette échelle n'existait pas au moment de la conception de ces rénovations, aussi les concepteurs et les ménages n'avaient aucune attente ou objectif relatifs à cette évaluation.

7.4 Bilan en Cep 5 usages et objectif BBC

Méthodologie :

Les données présentées dans ce paragraphe ne sont pas issues d'un calcul, mais bien les résultats de la campagne de mesure. Ces résultats sont exprimés avec le périmètre et les unités du Cep du calcul définissant la performance BBC, afin de les comparer à l'objectif BBC.

Pour cette comparaison, les résultats seront exprimés au **m² SHON**. Cette surface n'étant pas connue sur une part importante de l'échantillon, nous nous sommes basés sur la SHAB et avons appliqué un coefficient de conversion SHON/SHAB fixe de 1,2.

Par ailleurs, le périmètre du Cep comporte des usages non et partiellement suivis :

- La consommation de la **VMC et des auxiliaires** est issue de la mesure si elle est connue (voir §6.1 et 6.2). Si ce n'est pas le cas, nous avons *estimé* cette valeur sur la base de la moyenne observée par typologie : simple flux / double flux pour la ventilation, Chaudière (gaz a priori, mais nous avons affecté ce ratio également aux chaudières à granulés et PAC, faute de données plus précises) / poêle à granulés / présence d'un CESI.
- **L'éclairage** n'a pas été suivi ici. Nous nous sommes basés sur la valeur moyenne mesurée dans l'étude **PANEL Elecdom**¹³ qui est de 1,7 kW.h_{EF}/m²_{SHAB}/an d'électricité, soit 3,7 kW.h_{EP}/m²_{SHON}/an.

Les consommations sont exprimées **en énergie primaire**, avec les coefficients conventionnels du label BBC rénovation, soit 2,58 pour l'électricité, 0,6 pour le bois et 1 pour les autres combustibles.

La performance BBC rénovation est défini par l'atteinte d'un Cep = 80 kW.h_{EP}/m²_{SHON}/an modulé du climat et de l'altitude (voir §1.3.2).

Les résultats de mesure et usages estimés comportant ce Cep sont présentés dans la Figure 194 ci-dessous.

¹³ Campagne de mesure réalisée par Enertech avec le soutien de l'ADEME et de RTE. Rapport complet et synthèse disponible sur <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4473-panel-usages-electrodomestiques.html>

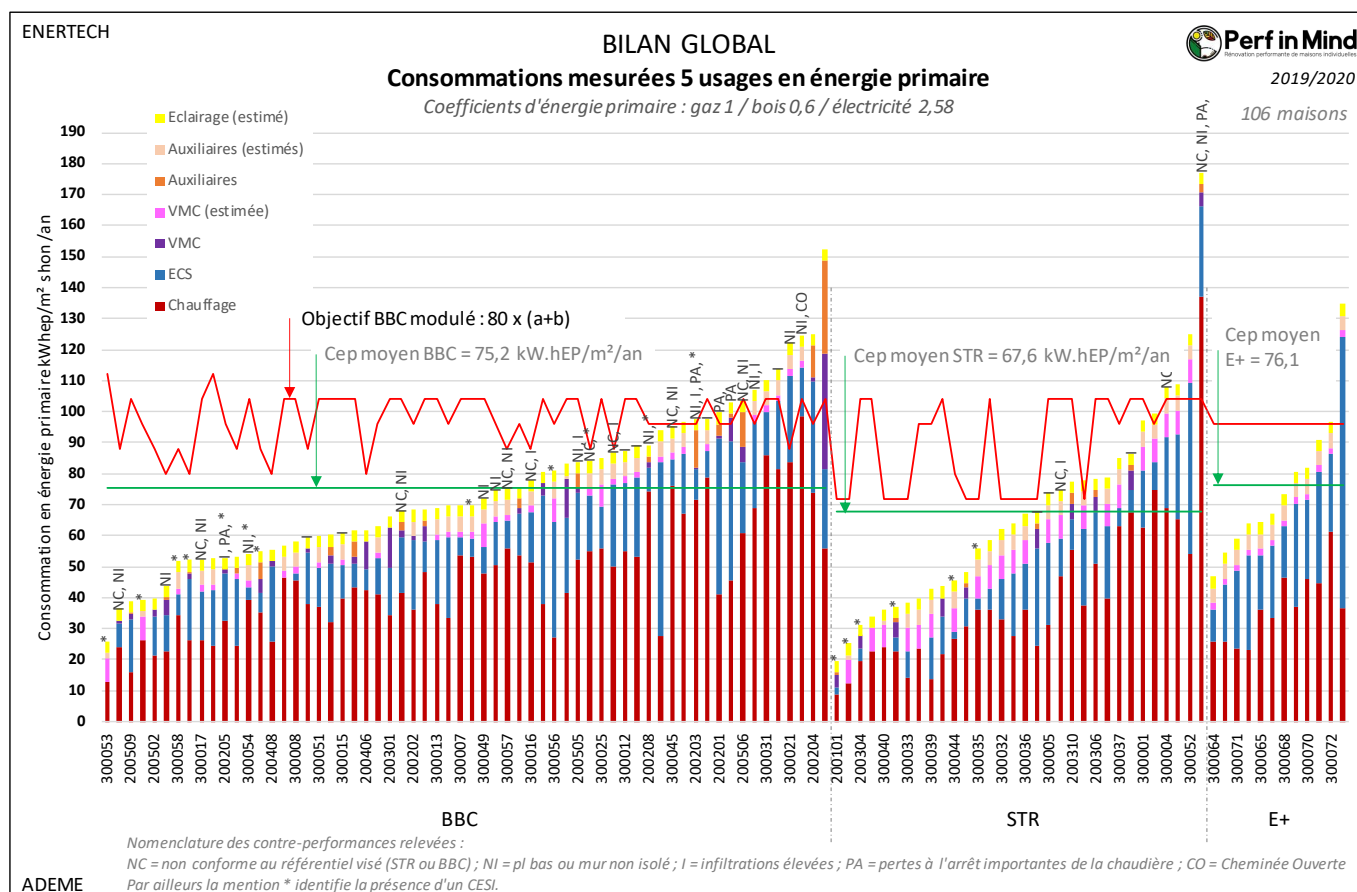


Figure 194 : Consommations mesurées sur les 5 postes du calcul réglementaire et comparaison aux objectifs BBC rénovation.

Dans l'analyse qui suit, nous nous concentrerons uniquement sur les 62 rénovations visant le niveau BBC rénovation. On note que :

- Le **Cep moyen** sur 5 usages est de 75,2 kW.hEP/m²_{SHON}/an, ce qui **respecte la valeur pivot nationale** de 80 kW.hEP/m²_{SHON}/an ;
- 51 rénovations (82%) respectent l'objectif BBC modulé. Parmi les 11 qui ne le respectent pas, 7 comportent des contre-performances.
- Si l'on se donne une marge de tolérance de 20% sur l'objectif modulé, **59 rénovations (95%) respectent l'objectif modulé avec marge de tolérance**. Si l'on exclut les 9 BBC qui n'ont pas respecté le référentiel (code « NC » au sommet des barreaux), cette proportion est de 94% (50 sur 53).

On peut conclure de cette analyse que les rénovations définies par l'objectif BBC rénovation ont globalement très bien respecté l'objectif énergétique visé, avec plus de 95% de respect de l'objectif modulé avec une marge de tolérance de 20%.

Ce résultat est d'autant plus positif que d'autres campagnes de mesure sur le logement collectif rénové ou neuf montrent dans la grande majorité des cas que le calcul réglementaire est très optimiste par rapport à la réalité mesurée.

Sur les autres dispositifs STR et E+, 93% des maisons (41 sur 44) atteignent l'objectif BBC modulé avec la tolérance de 20%.

7.5 Bilan tous usages et objectif Energie positive

Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la consommation d'énergie **tous usages confondus**, c'est-à-dire à la totalité des consommations énergétique de la maison. Elle comprend la consommation des autres usages électriques décrite au §6.3. Nous l'exprimerons ici **en énergie primaire**, avec les coefficients conventionnels du BBC rénovation, soit 2,58 pour l'électricité, 0,6 pour le bois et 1 pour les autres combustibles.

Celle-ci sera mise en regard de la **production locale d'énergie renouvelable**, le cas échéant. En l'occurrence, seules des installations photovoltaïques ont été mises en œuvre dans les maisons suivies (voir §3.4). Sur ces 16 installations, la production photovoltaïque n'est connue que pour les 12 maisons EnergieSprong et 1 maison supplémentaire. Pour les autres, le compteur n'a pas été instrumenté et/ou l'installation était en autoconsommation, ce qui ne permet pas d'accéder facilement à la production.

Sur les 12 maisons EnergieSprong, la production annuelle a été de 103 728 kW.h_{ef}/an, pour une puissance installée de 110 kWc (au total pour les 12 maisons, soit 9,2 kWc par maison), ce qui représente une productivité annuelle de 943 kW.h/kWc. Rapportée à la surface habitable des maisons, cette production représente 101,7 kW.h_{ef}/m²_{shab}/an.

Concernant l'autre maison, la production annuelle a été de 2 907 kW.h_{ef}/an sur l'année 2019-2020, pour une puissance installée de 3 kWc, soit 969 kW.h/kWc. Rapportée à la surface habitable de la maison, cette production représente 24,2 kW.h_{ef}/m²_{shab}/an.

En énergie primaire, la production photovoltaïque a été valorisée avec un coefficient 2,58. En effet, nous considérons que l'électricité produite se substitue à de l'électricité du réseau, qu'elle soit autoconsommée localement ou à l'échelle du quartier ou du village.

Les résultats sont présentés en Figure 195 ci-dessous.

Ce que l'on note en premier lieu sur ce graphique, c'est **l'importance des autres usages de l'énergie**. Ils représentent **en moyenne 46%** de la consommation totale d'énergie primaire. Or, mis à part l'objectif énergie positive, aucun référentiel ne prend en compte ces consommations, car on dispose de peu de levier d'action en tant que conception, et les prévoir à l'avance reste quasiment impossible. Cependant, les habitants eux-mêmes disposent de leviers d'action, à commencer par l'éclairage performant et surtout les équipements électroménagers performants, la maîtrise de la consommation des box internet etc. (voir à ce sujet le rapport **PANEL Elecdom** déjà cité).

On constate également une **énorme dispersion** des consommations tous usages : elles varient de 41,5 à 355 kW.h_{EP}/m²_{SHAB}/an, soit un rapport max/min de plus de 8. La moyenne s'établit à 162 kW.h_{EP}/m²_{SHAB}/an.

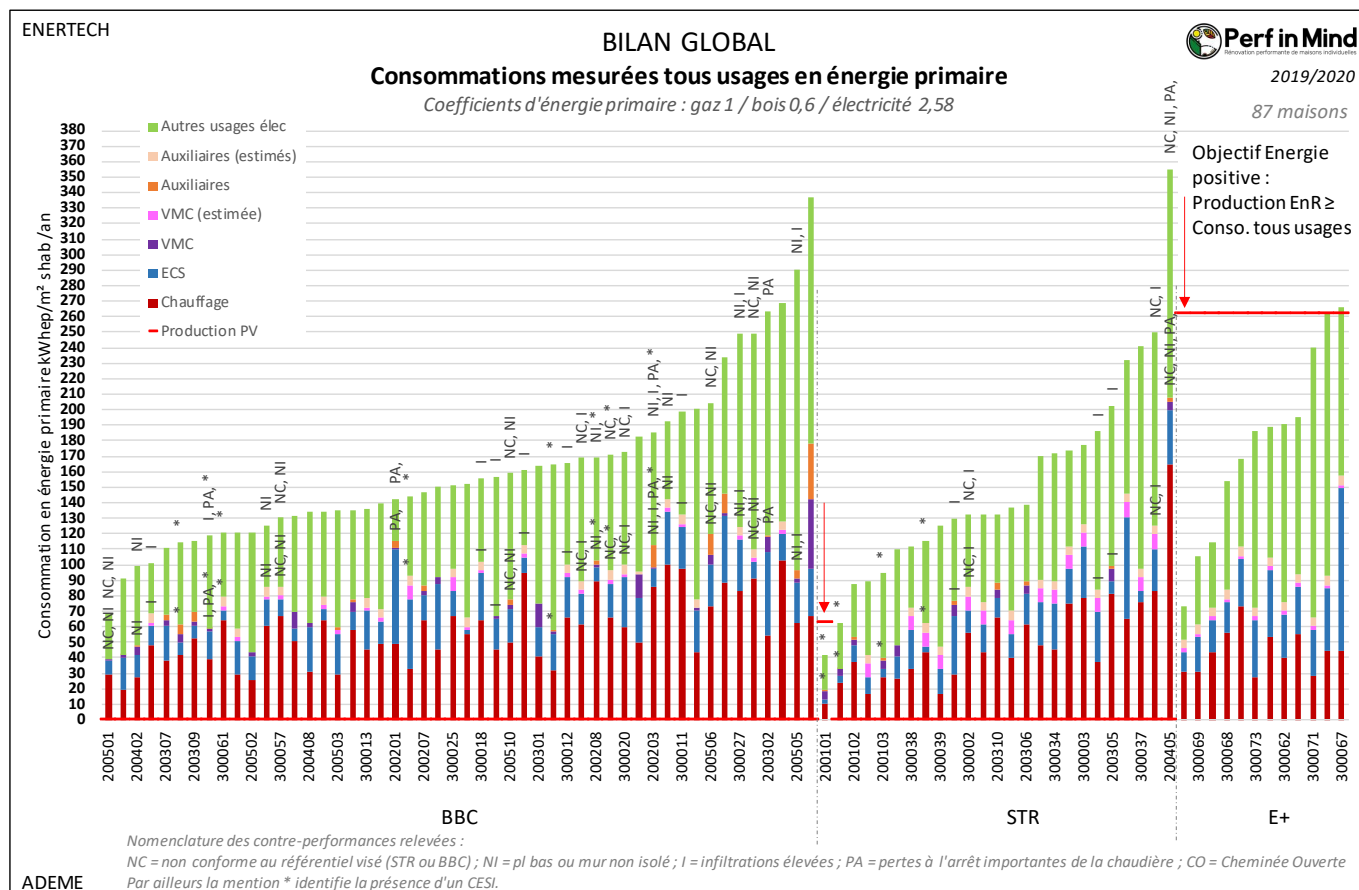


Figure 195 : Consommations mesurées tous usages et comparaison à l'objectif Energie positive.

Si l'on se concentre sur les 12 maisons EnergieSpong, on constate :

- Elles ont consommé en moyenne 179 kW.h_{EP}/m²_{SHAB}/an. Au regard de la production photovoltaïque de 262 kW.h_{EP}/m²_{SHAB}/an, **leur objectif global d'être à énergie positive est largement atteint.**
- Si l'on détaille maison par maison, on voit que 11 d'entre elles (92%) respectent ce bilan à énergie positive.

Nous pouvons donc conclure également sur un excellent respect des objectifs de cette opération.

Par ailleurs, on note que la seule autre maison dont la production photovoltaïque est connue est également à énergie positive, grâce à ses 3 kWc installés mais surtout grâce à sa performance sur les 5 usages et à la sobriété de ses usages électriques (cette maison correspond à la plus faible consommation tous usages).

CONFORT

8 Confort thermique

Méthodologie :

Définition de l'été et de l'hiver :

- Hiver : nous avons considéré les mois de décembre-janvier-février selon la convention adoptée par Météo France¹⁴.
- Été : 2 types de traitement ont été effectués
 - o Calcul du nombre d'heures pendant lesquelles la température dépasse 28°C. Etant donné qu'on peut observer ces surchauffes en amont et aval de l'été, nous avons réalisé ce traitement sur une période large allant du 15/05/19 au 15/10/19.
 - o Etude du confort adaptatif (norme NF 15 251) : le traitement a été effectué sur la même période.

Températures prises en compte :

2 sondes de température ont été installées dans chaque logement : une dans le séjour et une dans une chambre. L'hygrométrie a également été mesurée dans le séjour.

Divers problèmes rencontrés au cours de la campagne de mesures nous privent des mesures sur une partie de la période. Nous avons considéré les données suivantes pour les différents traitements :

- Pour l'hiver, nous avons établi un « indicateur de température de la pièce de vie » qui est la température moyenne du séjour sur la période lorsque la donnée existe. Quand elle n'est pas disponible, nous avons déterminé le coefficient moyen liant la température de la chambre à la température du séjour sur la période pour laquelle ces 2 données sont valides. Nous avons ensuite « recréé » l'« indicateur de température de la pièce de vie » en appliquant ce coefficient à la température de la chambre sur toute la période prise en compte pour l'hiver. En dernier recours nous avons considéré la température du séjour sur la période d'hiver pendant laquelle des données existent.
- Pour l'été, lorsqu'à la fois les données de températures de la chambre et du séjour sont correctes, nous considérons celles de la pièce la plus défavorisée (sur le critère du nombre d'heures où la température est supérieure à 28°C), sinon nous utilisons les mesures de la seule pièce dans laquelle les données sont valides. Seuls les logements pour lesquelles nous possédons des données pour l'ensemble de l'été sont pris en compte dans cette étude.

¹⁴ <http://www.meteofrance.fr/actualites/4896487-ete-pourquoi-les-saisons-meteorologiques-different-elles-des-saisons-astronomiques>

8.1 Températures en hiver

8.1.1 Température moyenne

La température moyenne, tous logements confondus, est de 20,0°C, ce qui est cohérent avec la température souhaitée par les habitants qui est également de 20°C (voir §1.5.2, Figure 34). Ces 20°C sont par ailleurs inférieurs à ce qu'on observe pour les logements collectifs (plutôt 21°C dans les diverses campagnes de mesures d'Enertech). Dans 21% de l'échantillon, elle est inférieure à 19°C et elle est supérieure à 21°C uniquement dans 18% des logements.

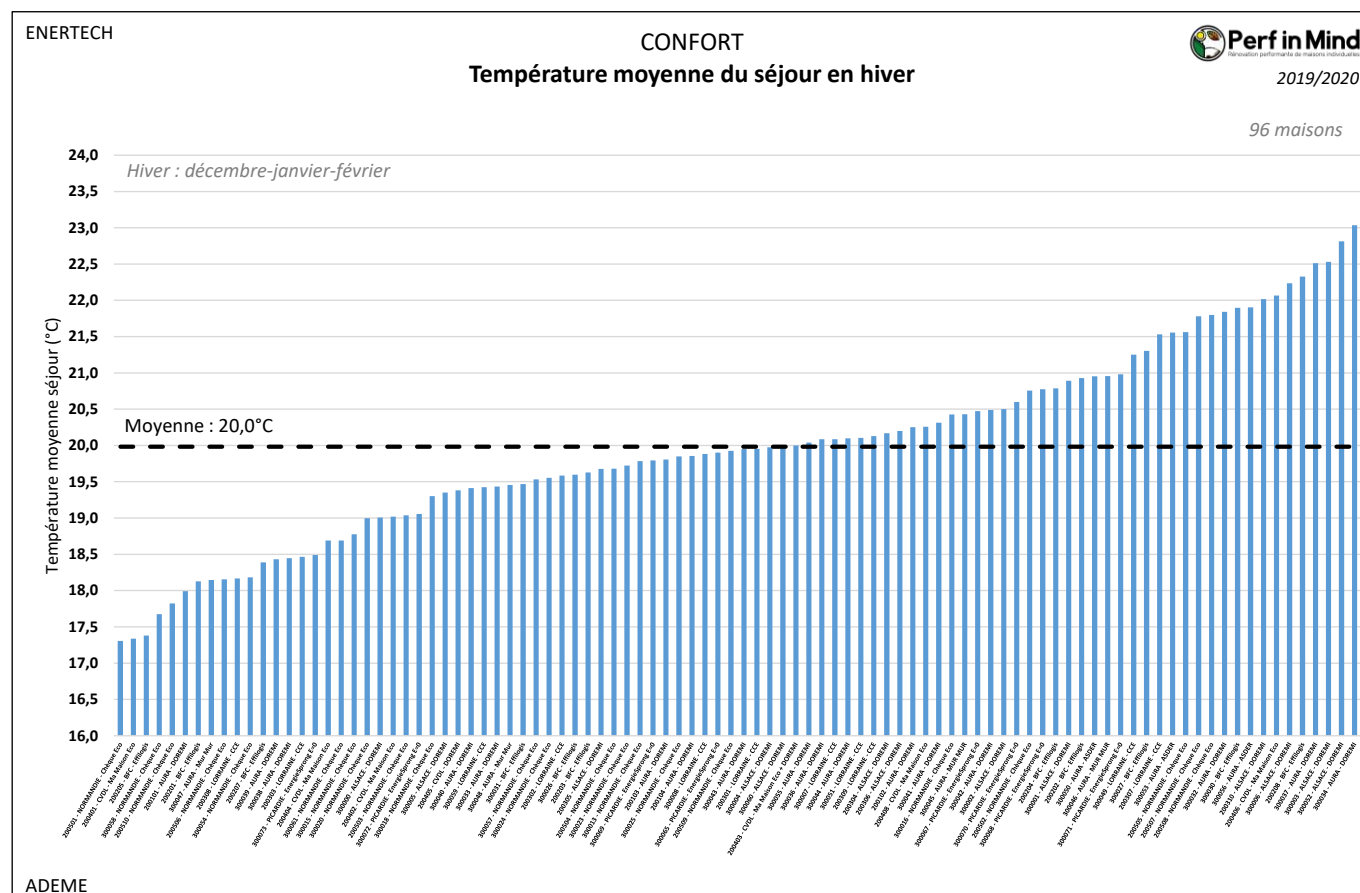


Figure 196 : Graphique des températures moyennes dans le séjour en hiver.

% < 19	21%
% $19 \leq T^{\circ}\text{C} < 20$	34%
% $20 \leq T^{\circ}\text{C} < 21$	26%
% $21 \leq T^{\circ}\text{C} < 22$	10%
% $22 \leq T^{\circ}\text{C} < 23$	7%
% $T^{\circ}\text{C} \geq 23$	1%

Figure 197 : Tableau des pourcentages d'occurrence par plage de température moyenne dans le séjour en hiver.

8.1.2 Gradient de température entre le séjour et la chambre

Dans près de trois quarts des logements pour lesquels on possède les données, la température dans le séjour est, en moyenne sur la période considérée, supérieure à celle de la chambre. Mais les écarts sont faibles : dans 58% des cas, le gradient est compris dans l'intervalle [-1 ; +1°C].

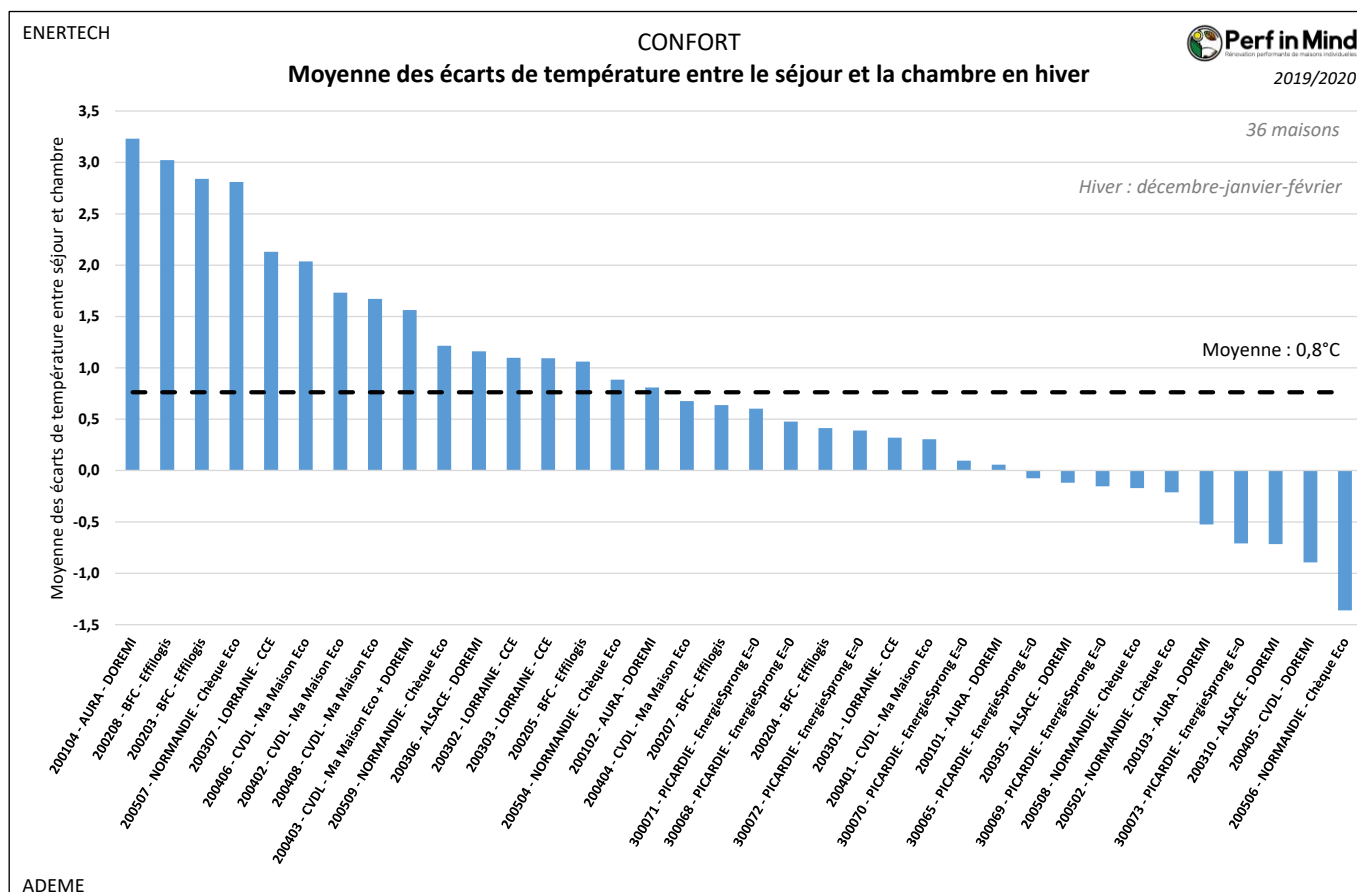


Figure 198 : Graphique de l'écart moyen de température entre le séjour et la chambre suivie le séjour en hiver.

8.1.3 Température moyenne en fonction du mode de chauffage

Avertissement : les résultats de ce paragraphe doivent être considérés avec une grande prudence étant donné la taille très restreinte des échantillons. De plus il faut avoir en mémoire que les températures considérées sont celles des séjours (pièce dans laquelle se trouve par exemple la plupart du temps les poêles), et non une valeur moyenne entre les différentes pièces des maisons.

La température moyenne dans les logements ne semble pas être fonction de l'énergie de chauffage dans le cas de rénovation performante de maisons. En effet, si on ne tient pas compte du chauffage effet Joule (température moyenne légèrement inférieure -18,7°C- mais seulement 1 logement), l'écart est de seulement 0,6°C entre les maisons chauffées à l'aide de poêles à bûches (19,5°C en moyenne) et les logements équipés de PAC (20,1°C en moyenne).

Dans le cas des poêles bois bûches, la température moyenne est très légèrement supérieure la nuit (+0,2°C) du fait d'un dernier chargement de bois le soir qui fait monter la température une partie de la nuit. De plus, la relance matinale (chargement manuel au moment du lever) est plus tardive que pour les autres modes de chauffage (relance automatique programmée avant l'heure de lever).

Pour le chauffage électrique à effet Joule, granulés et gaz, la température en journée est supérieure d'environ 0,5°C en journée. Cette intermittence jour/nuit n'est pas observée dans le cas du chauffage par PAC.

	Température moyenne hiver séjour (°C)	Différence de températures moyennes (jour-nuit) hiver séjour (°C)
Electricité (Joule) - 1 maison	18,7	0,6
Poêle Bois bûches - 7 maisons	19,5	-0,2
Poêle Bois granulés - 10 maisons	19,9	0,5
Chaudière (gaz et granulés) - 64 maisons	20,0	0,4
Electricité (PAC) - 14 maisons	20,1	0,0

Figure 199 : Tableau des températures moyennes en hiver en fonction du mode de chauffage, et différence de température entre jour et nuit dans le séjour.

8.1.4 Evolution de la température au cours de la journée

❖ Semaine/ WE

La Figure 200 présente l'évolution de la température moyenne des logements au cours de la journée en semaine et le week-end.

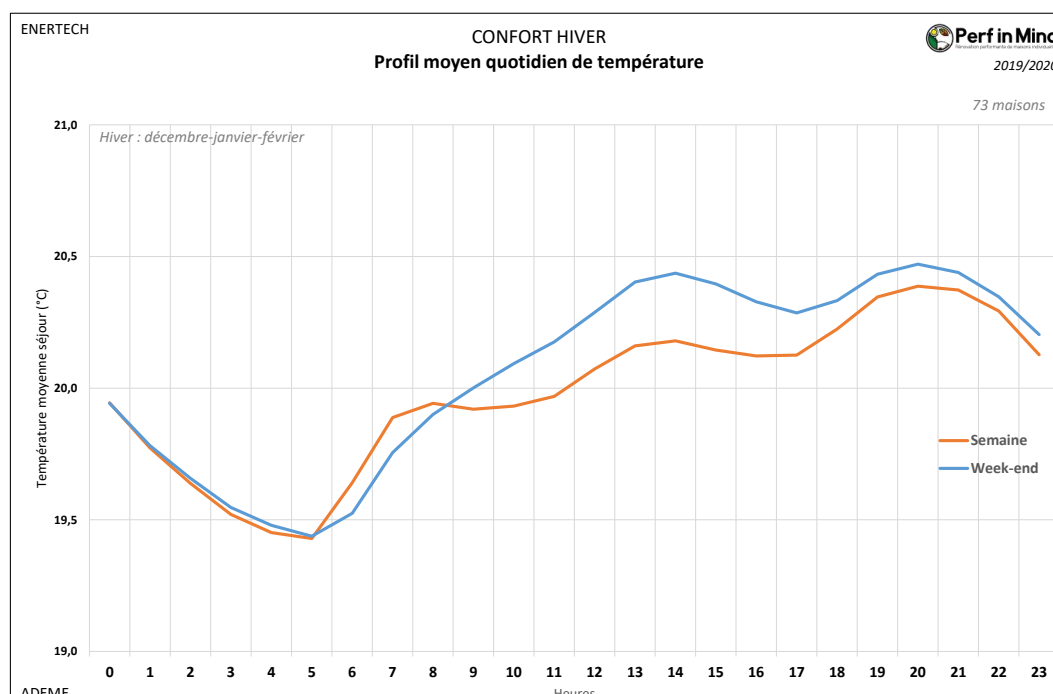


Figure 200 : Graphique des profils moyens de température sur une journée en semaine et le week-end, en hiver.

On observe une baisse progressive de température à partir de 21 heures jusqu'à 6 heures. Elle augmente ensuite en journée (du fait du chauffage mais également des apports solaires et internes) pour atteindre

sa valeur maximale entre 19 et 21 heures. L'écart entre les extremums est d'environ 1°C. Mais la température moyenne le jour (6-22h) est supérieure de seulement 0.3°C à la valeur moyenne la nuit.

Le profil est légèrement différent les week-ends. L'augmentation matinale de température est plus tardive et la température est globalement plus élevée en journée. L'évolution en soirée est similaire.

❖ Profil en fonction du mode de chauffage

Le graphique de la Figure 201 détaille les profils de température ambiante par mode de chauffage.

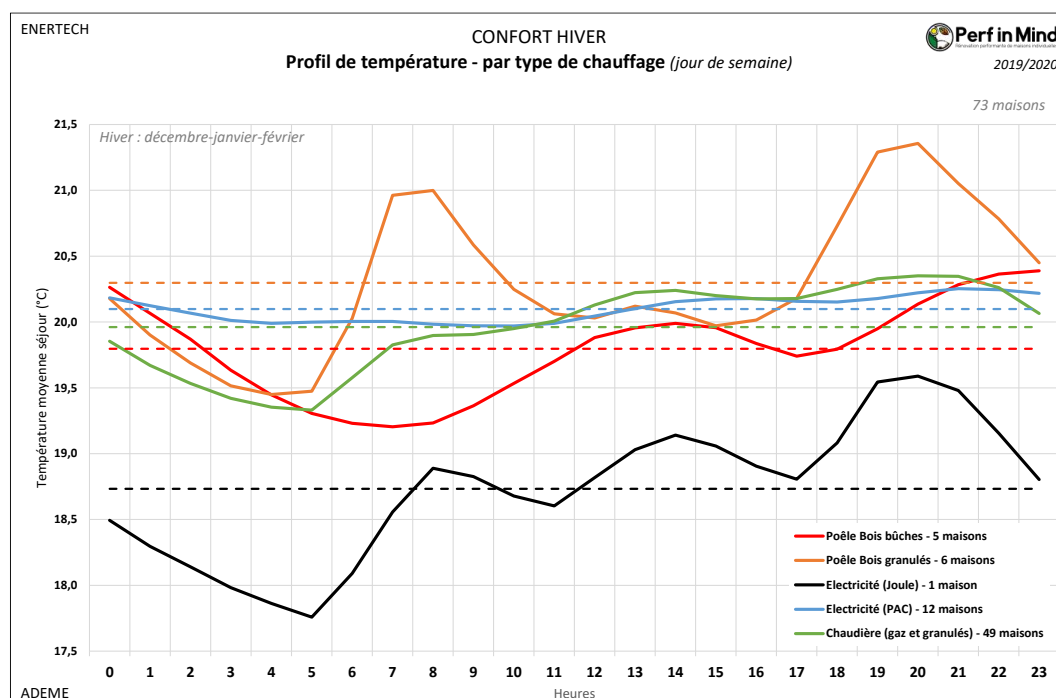


Figure 201 : Graphique des profils moyens de température sur une journée de semaine par type de chauffage, en hiver.

On retiendra que :

- L'intermittence la plus marquée s'observe pour les poêles à granulés. Ils sont souvent programmés pour 2 cycles de chauffe quotidiens (matin et soir). Une tendance similaire existe pour le chauffage à effet Joule mais il est impossible de conclure car l'échantillon ne comprend qu'un seul logement.
- Une température ambiante quasi constante est maintenue dans les logements chauffés à l'aide de PAC.
- Dans le cas des chaudières, une relance matinale a souvent lieu entre 5 et 6 heures. Dans certains logements, une seconde relance est observée en fin de journée.
- La relance matinale plus tardive pour le bois bûches peut s'expliquer par le fait que la recharge se fait manuellement et donc ne peut pas être anticipée avant le lever. La chute de température plus tardive provient probablement d'un dernier chargement le soir avant le coucher qui continue de chauffer le logement une partie de la nuit.
- L'augmentation de température en journée provient non seulement du chauffage mais également des apports solaires et internes (logement occupé en journée, appareils électriques).

Attention ces conclusions doivent être considérées avec prudence étant donné la faible taille des échantillons.

Pour certains modes de chauffage, on observe des profils de température ambiante très différents d'un logement à l'autre en fonction des habitudes d'usage :

Poêles à bois bûches

Certains participants ne font généralement qu'une flambée le matin (200101), d'autres uniquement le soir (300059) et d'autre le matin et le soir (200408). Les pratiques dépendent probablement à la fois de la température souhaitée et de l'occupation ou non en journée du logement.

Il est intéressant de constater que, malgré ce qu'on aurait pu redouter, les poêles à bois ne provoquent pas des variations de températures trop importantes dans les logements. Les habitants semblent réussir à adapter le rythme et l'importance des flambées pour maintenir la température souhaitée. De plus les poêles semblent d'une puissance suffisamment adaptée (pas surdimensionnée) pour que l'inertie de la maison parvienne à lisser les températures.

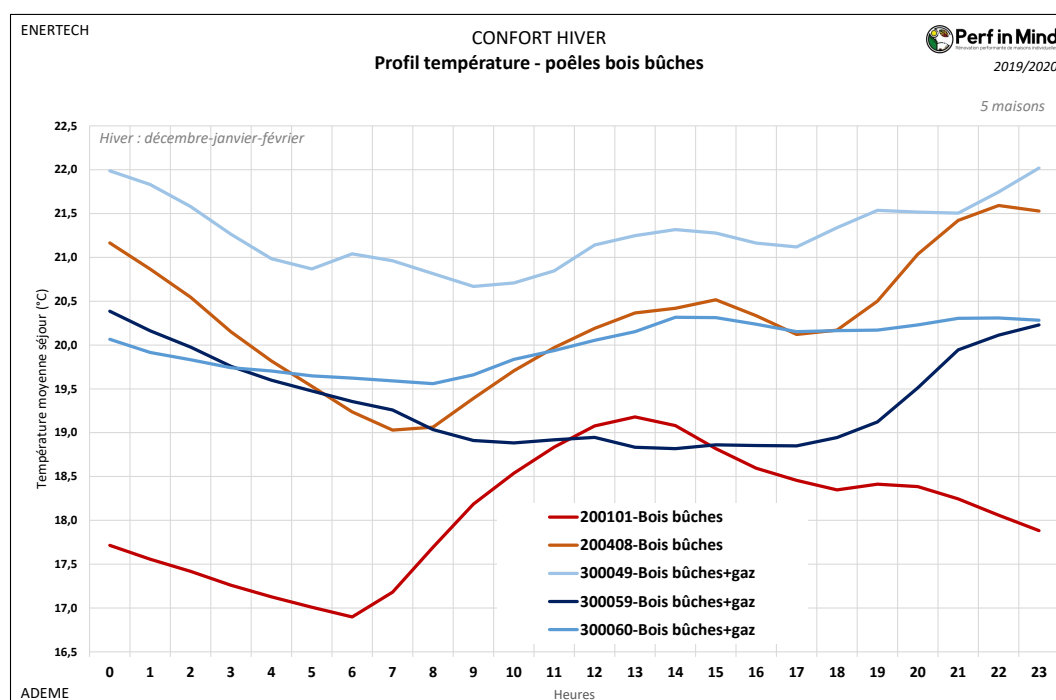


Figure 202 : Graphique des profils de température moyenne sur une journée pour les 5 maisons chauffées avec un poêle à bois.

Bois granulés

On remarque une augmentation de température très marquée le matin et le soir dans les logements 200401 et 300050 et dans une moindre mesure dans la maison 300055. Celle-ci s'explique probablement par l'utilisation d'un programmateur automatique intégré au poêle.

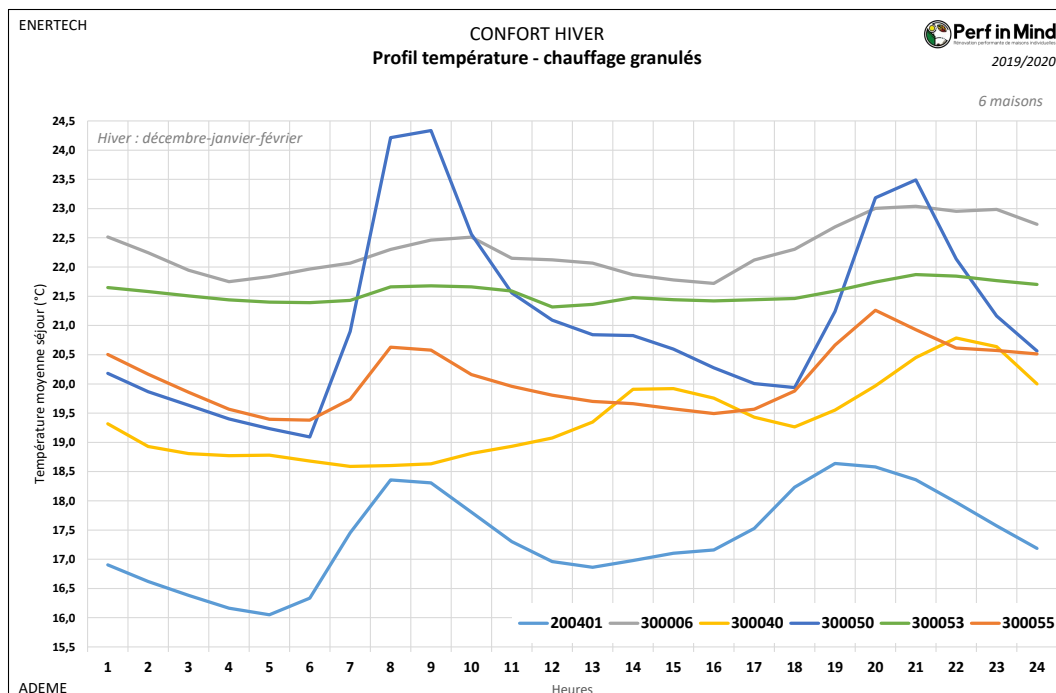


Figure 203 : Graphique des profils de température moyenne sur une journée pour les 6 maisons chauffées avec un poêle à granulés.

PAC :

Le profil de de température est très plat, à l'exception de celui du logement 200403 qui semble appliquer une programmation horaire. Les températures de consigne varient entre 17,5 à 22°C.

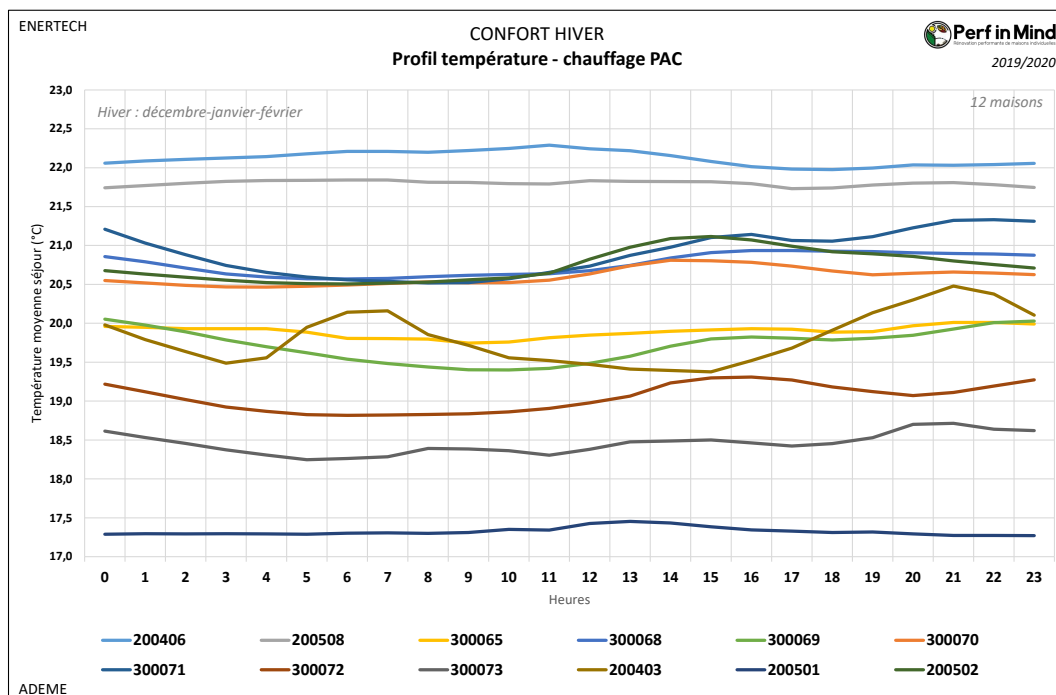


Figure 204 : Graphique des profils de température moyenne sur une journée pour les 12 maisons chauffées avec une pompe à chaleur.

Chaudière gaz

Etant donné le nombre élevé de chaudières gaz, nous n'avons représenté sur le graphique de la Figure 205 qu'un échantillon des profils de températures ambiantes rencontrées. Dans certains logements la température reste constante nuit et jour (300058, 300005, 300003) alors que dans d'autres, on observe une (300013, 300016), deux (200510, 300045), voire trois (300020) relances quotidiennes du chauffage. Lorsqu'il y a une programmation horaire du chauffage, on remarque systématiquement une augmentation de température le matin (plus ou moins tardive).

Les températures maintenues sont comme pour les pompes à chaleur très variables d'un logement à l'autre.

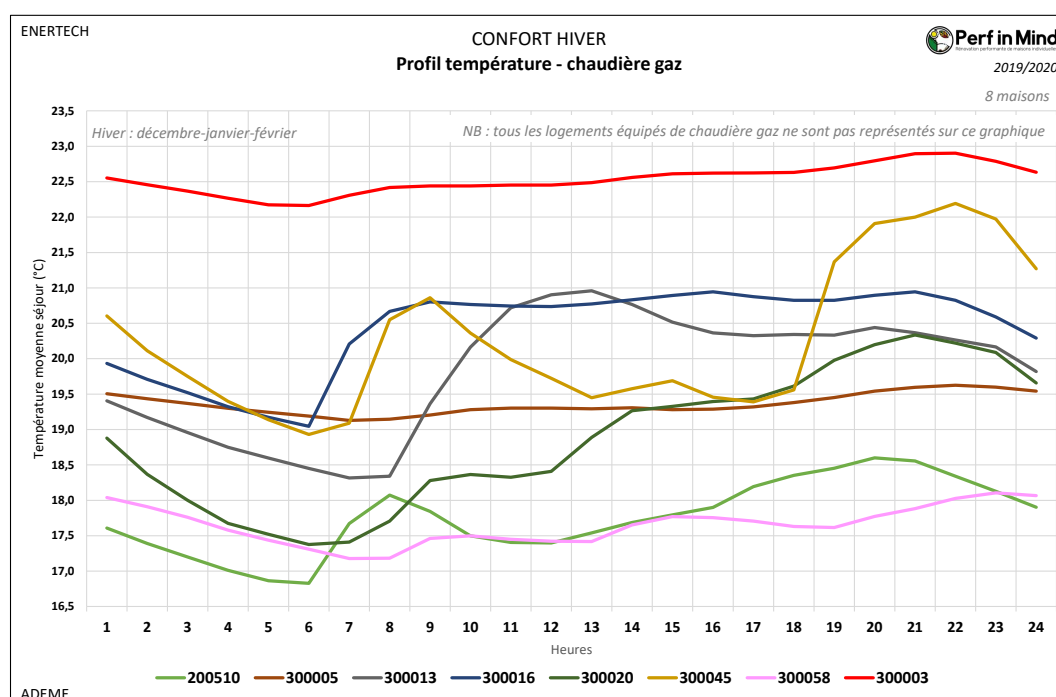


Figure 205 : Graphique des profils de température moyenne sur une journée pour un échantillon de maisons chauffées avec une chaudière gaz.

8.2 Température été

Méthodologie :

Dans cette étude, 2 indicateurs ont été retenus pour qualifier le niveau de confort d'été :

- Le temps pendant lequel la température est supérieure à 28°C ;
- Le temps pendant lequel la température dépasse un seuil dépendant de la température moyenne extérieure glissante, au sens de la NF EN 15251, de sorte à intégrer la capacité d'adaptation des occupants.

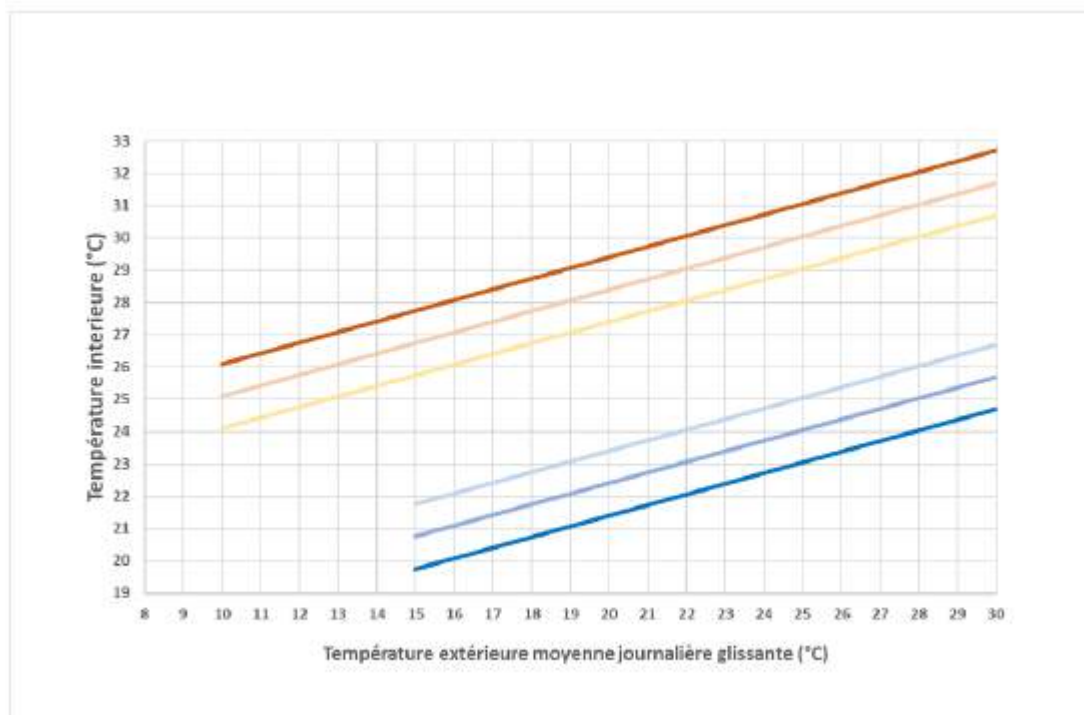


Figure 206 : Seuil de confort au sens de la norme NF EN 15251 (de la catégorie 1 à 3, de l'intérieur vers l'extérieur).

8.2.1 Critère de confort > 28°C

Différents référentiels de démarche environnementale (HQE, BDM...) s'accordent sur un nombre d'heures d'inconfort estival correspondant à une limite à ne pas dépasser, soit 40 heures au-delà de 28°C. Or en moyenne sur l'échantillon, la température de 28°C est dépassée 68 heures par an. Cette valeur moyenne cache une réalité contrastée. Ainsi, le critère de confort de 40 heures par an au-delà de 28°C est dépassé dans 32% des logements mais dans 56% des logements ce seuil est franchi moins de 10h/an.

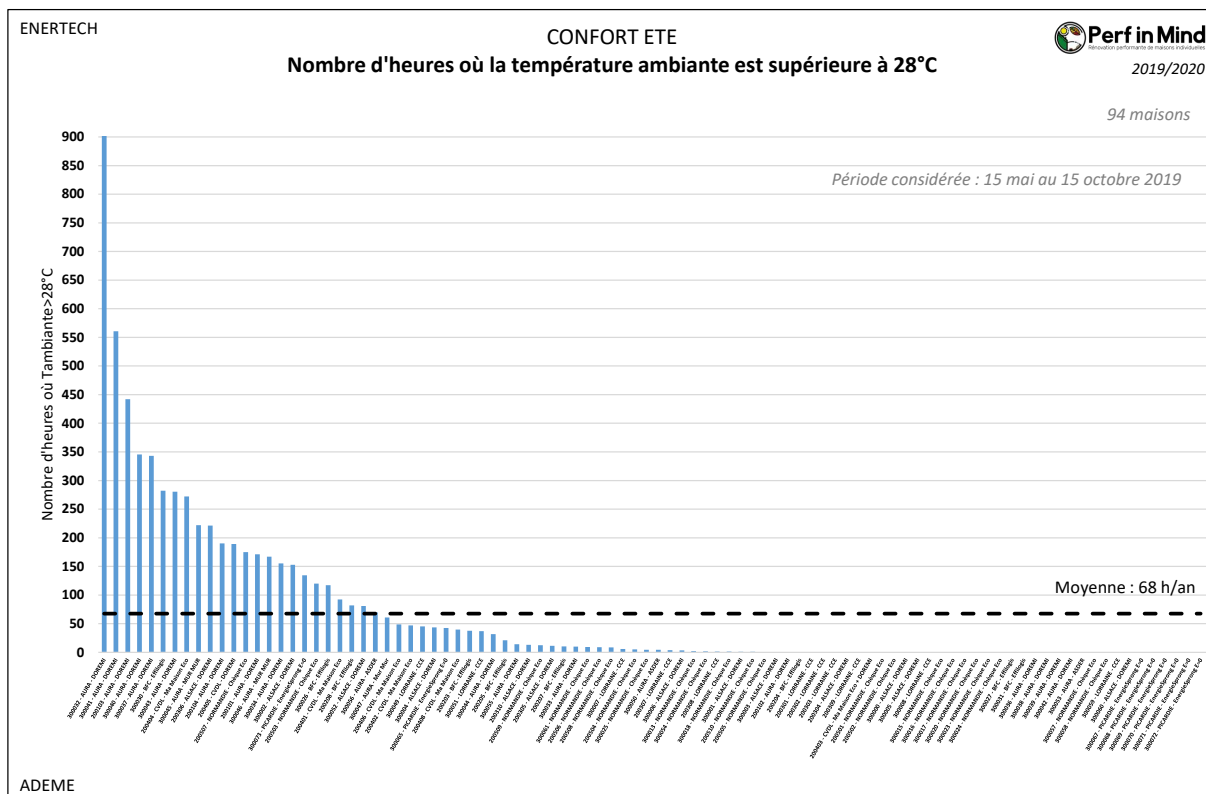


Figure 207 : Graphique du nombre d'heures où la température ambiante est supérieure à 28°C.

Pour prendre en compte la rigueur climatique estivale, nous avons calculé pour chaque logement le nombre de degrés-jours unifiés froid (DJU froid)¹⁵ en le rattachant à une station météo proche. De façon logique, on remarque, sur le graphique de la Figure 208, la tendance suivante : plus le nombre de DJU froid est élevé plus le nombre d'heures pendant lequel 28°C est dépassé est grand. Cependant, pour une même météo et donc un même nombre de DJU froid, on observe des écarts importants, liés aux caractéristiques du logement et aux pratiques du ménage.

¹⁵ Calcul DJU réfrigération selon la méthode COSTIC :

$((T_x + T_n)/2) - T_r$ si $T_n > T_r$

0 si $T_x < T_r$

$(T_x - T_r) * (0.08 + 0.42 * (T_x - T_r) / (T_x - T_n))$ sinon

Avec T_r : température intérieure de référence, T_n : température extérieure minimale, T_x : température extérieure maximale

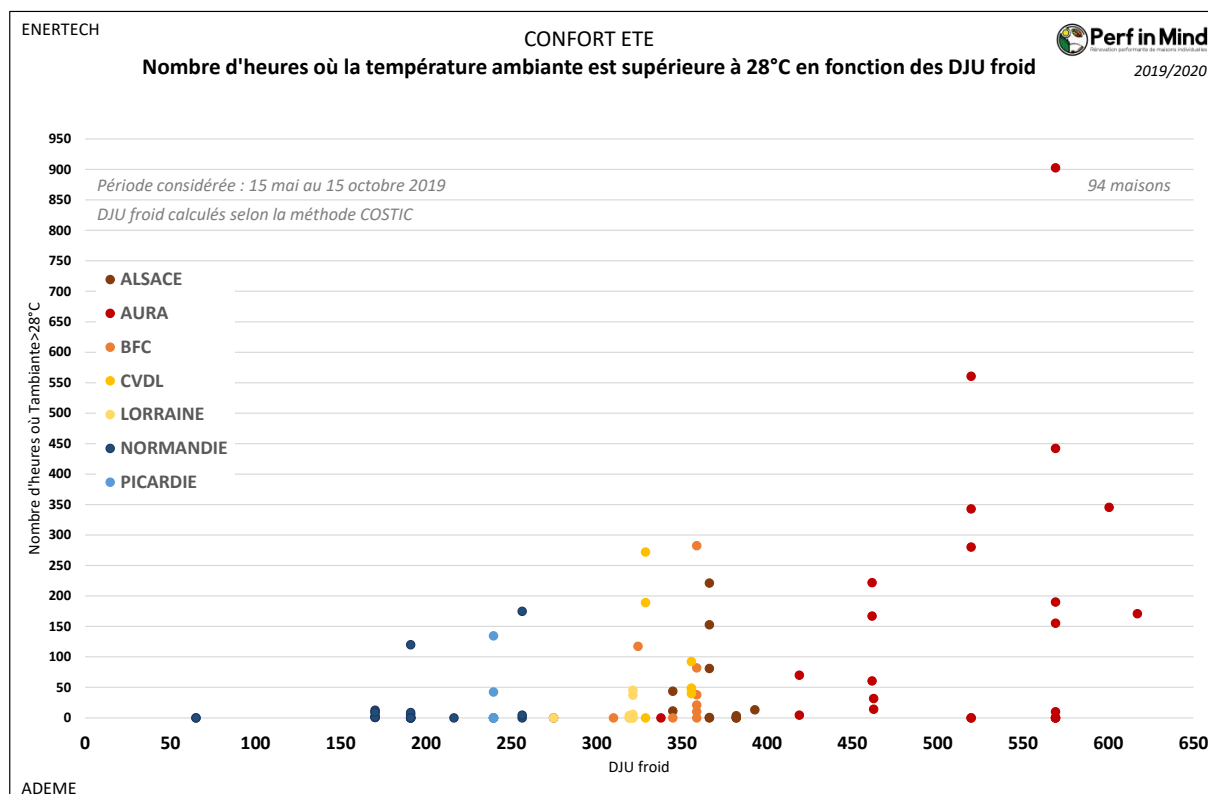


Figure 208 : Graphique du nombre d'heures où la température ambiante est supérieure à 28°C (axe vertical) en fonction de la chaleur de l'été, exprimée en DJU froid (axe horizontal).

Nous avons cherché, outre la rigueur climatique, des facteurs expliquant ces observations :

- Le logement le plus inconfortable au sens de ce critère (903 heures, soit près de 38 jours) n'est équipé que d'occultations partielles. De plus, son occupant indique ne mettre en œuvre aucune pratique permettant de limiter la surchauffe (occultation, aération nocturne...). Pourtant, il se déclare satisfait du niveau de confort de son logement.
- Les 5 logements qui présentent le plus grand nombre d'heures pendant lequel la température ambiante dépasse (plus de 300 heures dans tous les cas) sont situés en AURA et ont un nombre de DJU froid supérieur à 520. Mais, dans le même temps, 3 logements présentant un nombre de DJU froid supérieur à 520 ne présentent aucune heure supérieure à 28°C.
- Il n'existe pas de corrélation immédiate et simple entre le nombre d'heures pendant lesquelles la température intérieure est supérieure à 28°C et les caractéristiques du bâti (Ubat, ratio surface vitrée/surface habitable, présence de vélux, type d'isolation, occultations...). Le confort s'explique en effet à la fois par la conjugaison de l'ensemble des spécificités du logement et la façon dont il est utilisé.

8.2.2 Critère adaptatif

La norme NF 15 251 part du principe que le confort des usagers pour la température ambiante dépend d'une part de la température extérieure, d'autre part de son *historique*, dans le sens où l'on supporte mieux des températures élevées si la chaleur dure depuis quelques jours que si elle survient brutalement.

Pour ce faire on trace la température intérieure en fonction de la *température extérieure journalière pondérée par celles des jours précédents*.

La NF 15 251 définit ensuite 4 catégories de confort :

Catégorie	Description
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

Figure 209 : Tableau des catégories de confort définies par la norme NF 15 251.

Le graphique de la Figure 210 présente, pour chaque logement pour lequel les données sont disponibles, le nombre d'heures de dépassement du niveau normal attendu (niveau 2 au sens de la norme) selon qu'il est modéré (niveau 3, en jaune) ou fort (niveau 4, en bordeaux). 40% des habitations ne présentent aucun dépassement du niveau normal et 65% ne dépassent jamais le niveau de confort modéré qui est jugé acceptable dans les bâtiments existants. Pour ce qui est des dépassements forts (33 logements), ils se produisent dans 76% des cas moins de 24 heures par an.

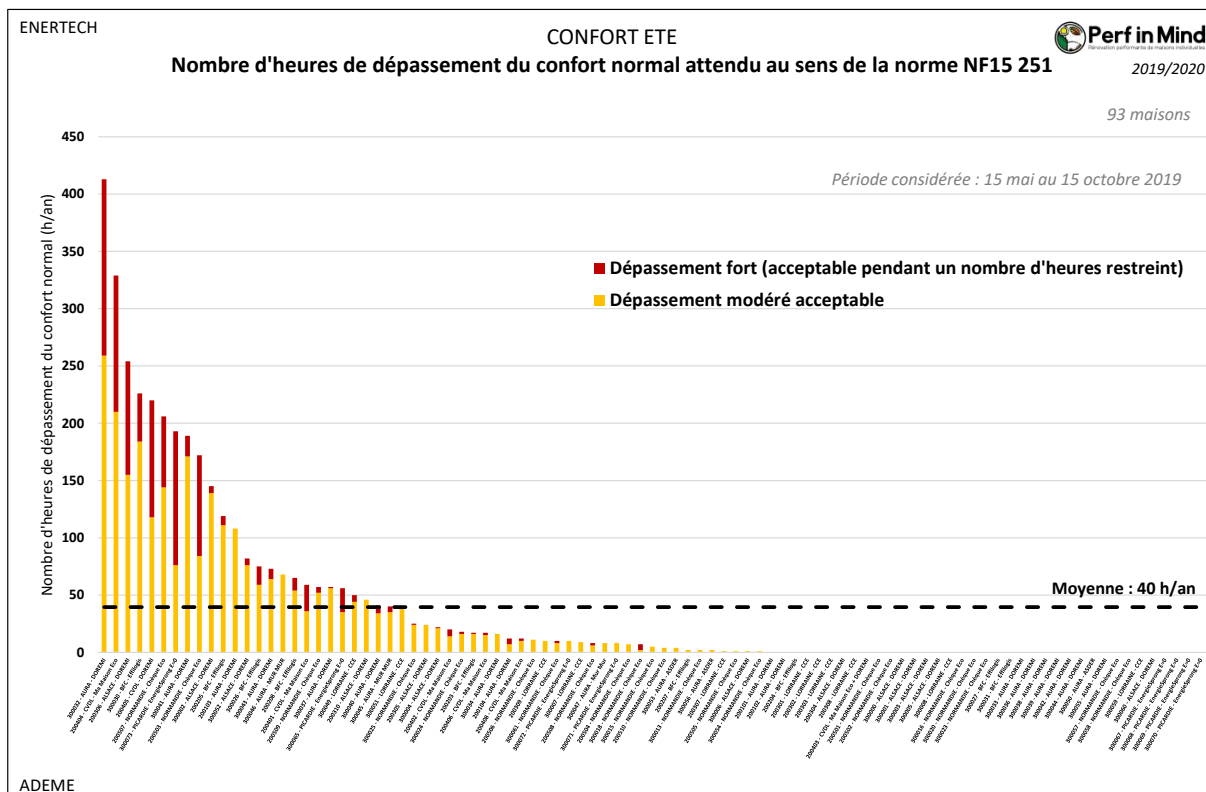


Figure 210 : Graphique du nombre d'heures de dépassement du confort normal attendu au sens de la norme NF 15 251.

Avec l'approche adaptative, l'inconfort ne semble pas directement lié à la rigueur climatique. Les logements avec un nombre d'heures important en dehors du confort normal (plus de 100 heures) se situent même davantage dans les régions possédant un nombre de DJU froid autour de 350.

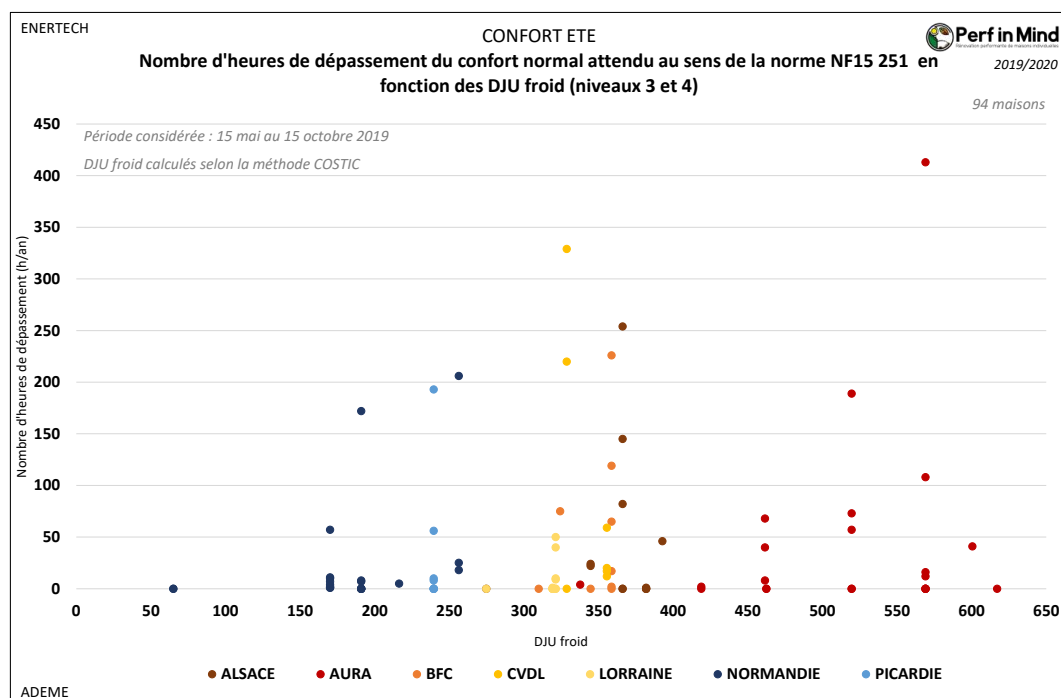


Figure 211 : Graphique du nombre d'heures où la température dépasse le niveau de confort selon les niveaux 3 et 4 de la norme NF 15 251 (axe vertical) en fonction de la chaleur de l'été, exprimée en DJU froid (axe horizontal).

Cette observation est confirmée si on ne considère que les heures de dépassement fort (niveau 4). Ainsi, à l'exception d'une maison située dans la Drôme, l'ensemble des logements présentant ce niveau d'inconfort élevé pendant plus de 20 heures par an présentent tous un nombre de DJU inférieur à 370 (3 logements situés en Centre Val de Loire, 2 en Picardie, 2 en Normandie, 1 en Alsace et 1 en Bourgogne Franche Comté).

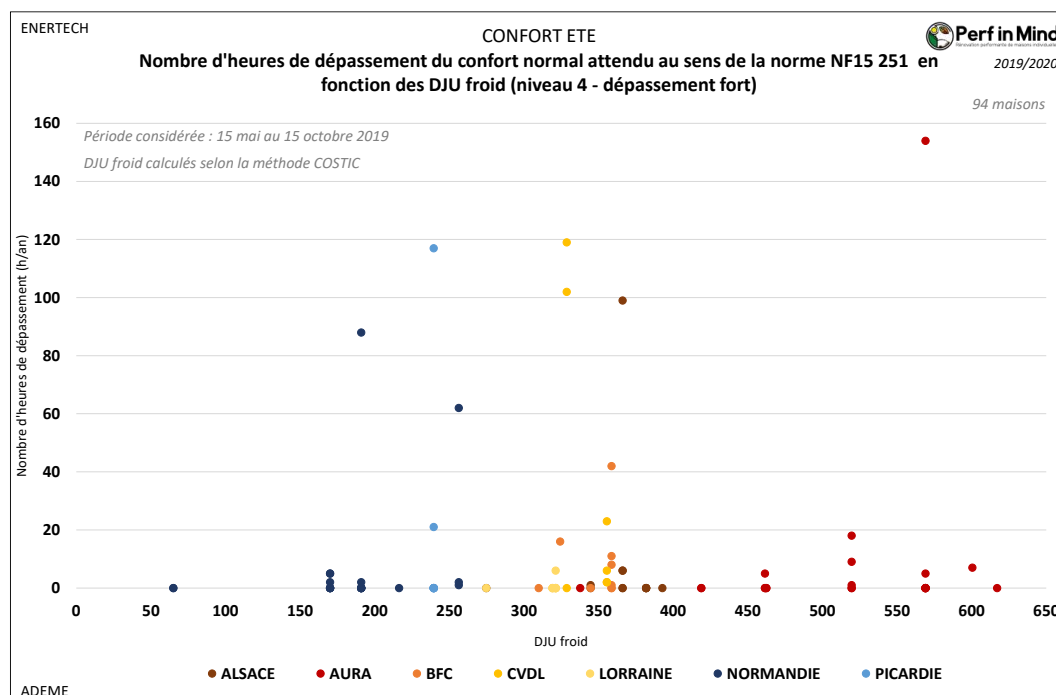


Figure 212 : Graphique du nombre d'heures où la température dépasse le niveau de confort selon le niveau 4 de la norme NF 15 251 (axe vertical) en fonction de la chaleur de l'été, exprimée en DJU froid (axe horizontal).

8.2.3 Satisfaction

Nous avons questionné les participants sur leur perception du niveau de confort en été dans leur logement. Les résultats sont surprenants. En effet, nous avons constaté par les 2 approches utilisés (nombre d'heures où la température ambiante est supérieure à 28°C et approche adaptative) que le confort n'était pas optimum dans tous les logements. Or le niveau de satisfaction des propriétaires, même s'il est moins élevé que pour le confort d'hiver, reste tout à fait acceptable pour le confort d'été (cf. paragraphe 0). Il s'est même largement amélioré entre les périodes avant/après travaux. Dans 88% des cas le niveau de satisfaction a augmenté (dans 10% des cas, il est même passé de « pas du tout satisfait » à « très satisfait »). Dans seulement 3% des cas il a diminué. A noter que la température ambiante n'a jamais dépassé 28°C pour un de ces 3 logements...

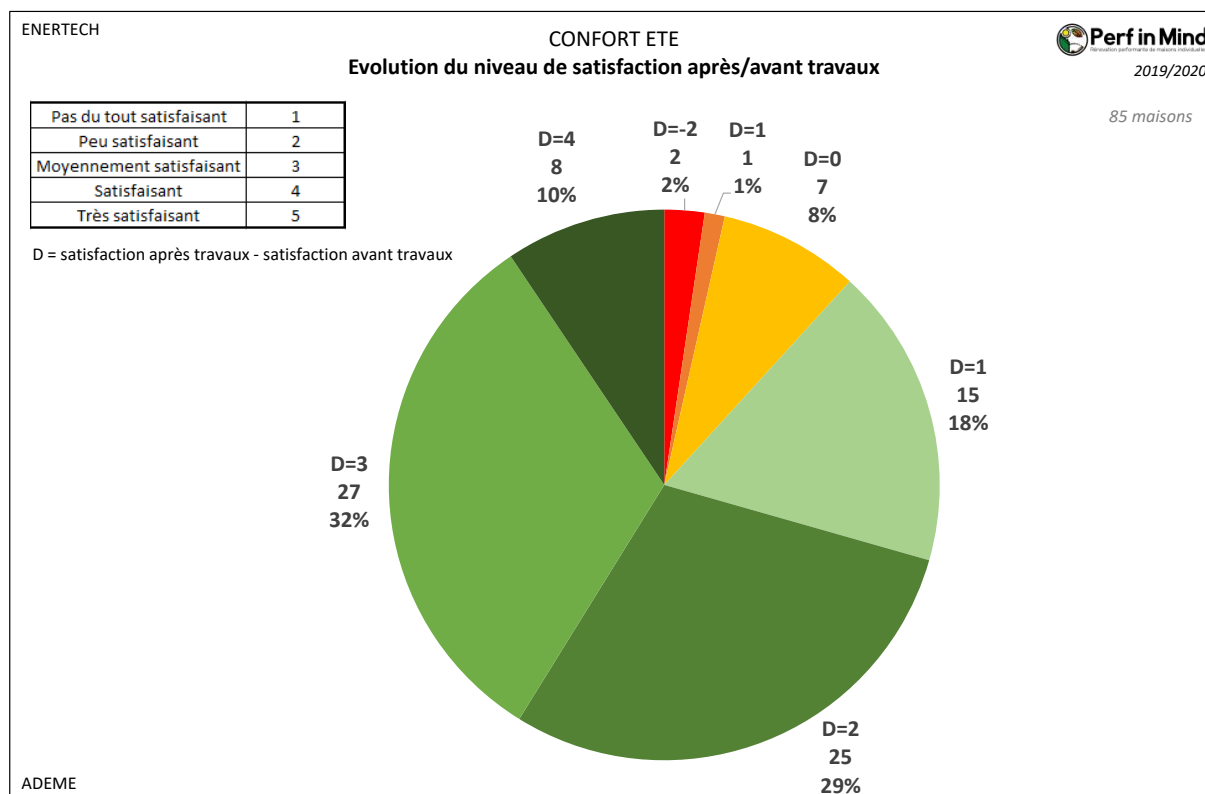


Figure 213 : Graphique de l'évolution de la satisfaction des habitants pour le confort d'été avant/après la rénovation.

L'indicateur D reflète l'évolution de la satisfaction : ainsi D=2 indique que la satisfaction est meilleure de 2 niveaux de réponse après rénovation qu'avant, par exemple le passage de la réponse « Peu satisfaisant » à « Satisfaisant ». Au contraire D=-1 signifie que la satisfaction est dégradée d'un niveau de réponse après rénovation.

Il est difficile de faire le parallèle entre ces déclarations et les analyses basées sur les 2 critères retenus :

- Les 4 logements présentant le plus d'heures en catégorie 4 au sens de la norme NF 15 251 (dépassement fort) se disent satisfaits, voire très satisfaits du confort d'été de leur logement.
- Les logements de l'ensemble des personnes ne se déclarant « pas du tout satisfaites » du confort estival présentent cependant des heures d'inconfort (de catégories 3 et 4).
- Les occupants des 8 logements présentant le plus d'heures pendant lesquelles la température ambiante dépasse 28°C trouvent le confort « satisfaisant ».

Cette analyse nous amène à constater le caractère très subjectif du confort d'été. Il nous semble toutefois rassurant de constater que globalement la rénovation énergétique a permis dans la grande majorité des cas d'améliorer le confort d'été.

NB : on rappelle qu'aucune des maisons suivies n'est en zone H2c ou H3. Les résultats sur le confort d'été ne sont a priori pas généralisables à ces zones.

9 Qualité de l'air intérieur

9.1 Taux de CO₂

Méthodologie :

Le dioxyde de carbone (CO₂) ne constitue pas en soi un polluant détériorant la qualité de l'air mais il constitue un **bon indicateur de la pollution de l'air due aux occupants** (odeurs, vapeur d'eau, émanations biologiques...). La norme européenne EN 13 779 de 2007 définit différents niveaux de qualité d'air relatifs à la concentration de CO₂ de l'air intérieur (Figure 214) :

Catégorie	Description	Concentration en CO ₂ : Niveau par rapport à l'air neuf (ppm). Intervalle type
IDA1	Excellente qualité	≤ 400
IDA2	Qualité moyenne	400 - 600
IDA3	Qualité modérée	600 - 1000
IDA4	Faible qualité	>1000

Figure 214 : Tableau de classification de la qualité de l'air intérieur (norme EN 13 779).

Les niveaux donnés dans ce tableau sont exprimés **en valeur relative, par rapport au niveau de concentration de CO₂ de l'air extérieur**. Nous n'avons pas mesuré la concentration de l'air extérieur, aussi nous retiendrons comme valeur de référence extérieure la moyenne des concentrations *intérieures* les plus faibles observées pendant 1% de la période de mesures soit 420 ppm. La qualité d'air sera donc qualifiée de « moyenne » entre 820 et 1 020 ppm de CO₂ et « modérée » de 1 020 ppm à 1 420 ppm.

Rappelons aussi qu'en France le taux de CO₂ maximum fixé par le règlement sanitaire départemental type (RSDT de 1985) est de 1300 ppm.

Métrologie : Des capteurs mesurant la concentration de CO₂ ont été placés dans les **chambres principales** des logements en suivi « avancé ». Le choix des chambres principales permet de s'assurer de la présence des occupants pendant la nuit.

La période étudiée s'étend du 01/11 au 31/03, c'est-à-dire les mois d'hiver, où l'ouverture des fenêtres est en principe réduite au minimum. L'échantillon où les mesures ont pu être exploité est de 35 logements.

La Figure 215 présente les monotones des concentrations de CO₂ mesurées dans les logements, c'est-à-dire que les concentrations mesurées sont rangées par ordre décroissant, et en abscisse on note le pourcentage du temps correspondant. Ainsi on lit par exemple que le logement représenté par la courbe bleu ciel a présenté un taux de CO₂ supérieur à 1420 ppm soit un air de « faible qualité » pendant 35% du temps.

Globalement on note des taux de CO₂ importants correspondant à un **air de « faible qualité » pendant plus de 10% du temps** dans une douzaine de logements sur 35, soit **un tiers des logements suivis**.

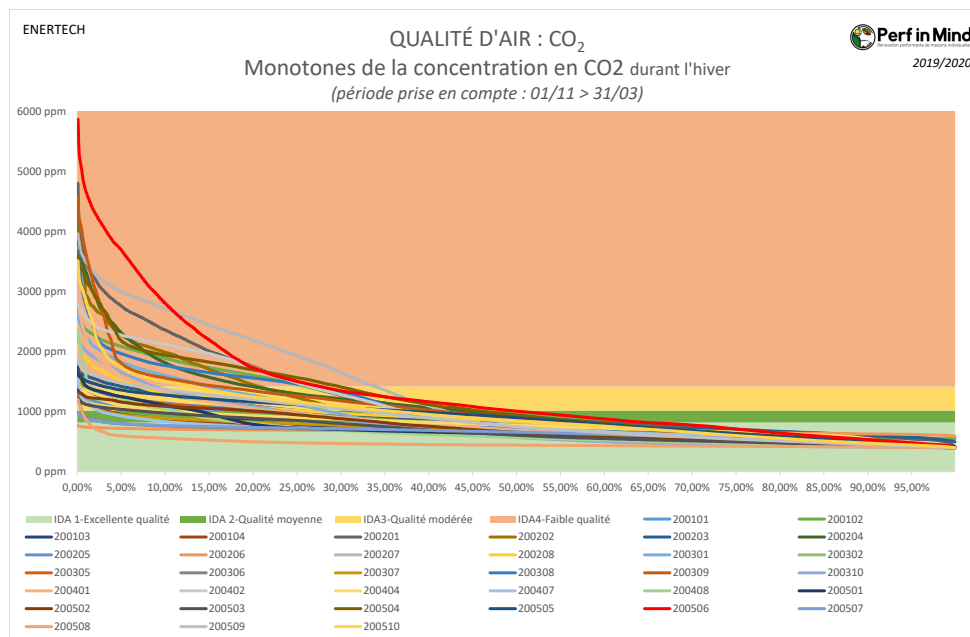


Figure 215 : Qualité d'air CO₂ – Monotones de la concentration en CO₂ durant l'hiver

La Figure 216 permet d'observer l'évolution moyenne journalière du CO₂ au cours de l'hiver. On remarque immédiatement que certains logements voient leurs concentrations en CO₂ largement se dégrader au cours de la nuit (on rappelle que les sondes sont placées dans la chambre principale).

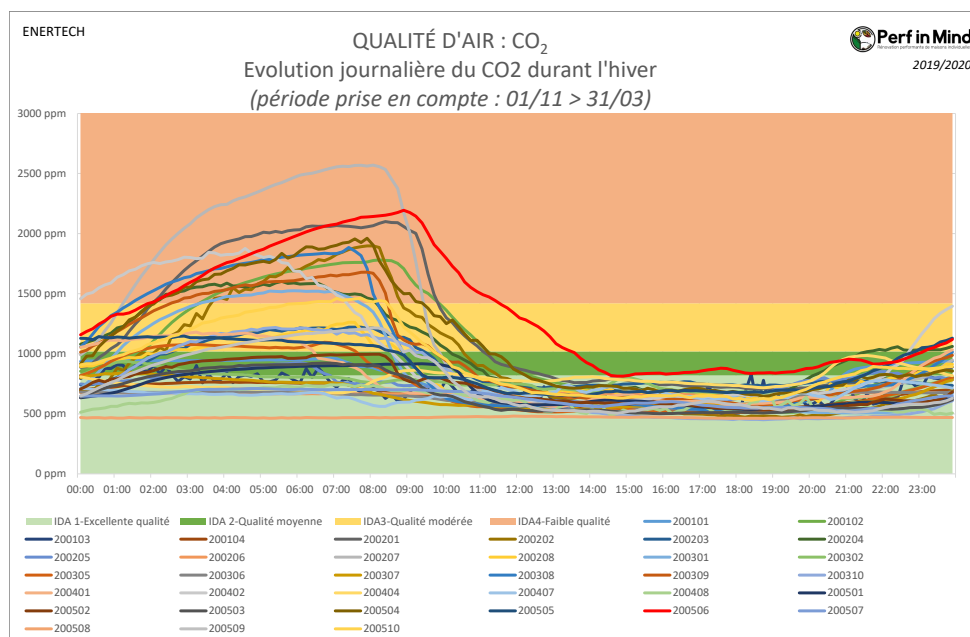


Figure 216 : QUALITÉ D'AIR : CO₂ - Evolution journalière du CO₂ durant l'hiver

Cette observation permet d'établir que **les concentrations élevées de CO₂ ont lieu le plus souvent pendant la nuit, soit lorsque le logement est occupé**, et non en l'absence des occupants. Ceci est important car en ventilation hygroréglable, le débit est réduit en l'absence d'habitants et est sensé remonter au niveau des ventilation autoréglables en leur présence. S'intéresser à la qualité de l'air

lorsqu'on est sûr que les habitants sont présents est donc important pour bien qualifier le service rendu aux habitants en termes de qualité d'air.

La Figure 217 permet de classer les logements en fonction de leur qualité d'air. En moyenne, les logements sont en qualité moyenne voir excellente durant 78% du temps.

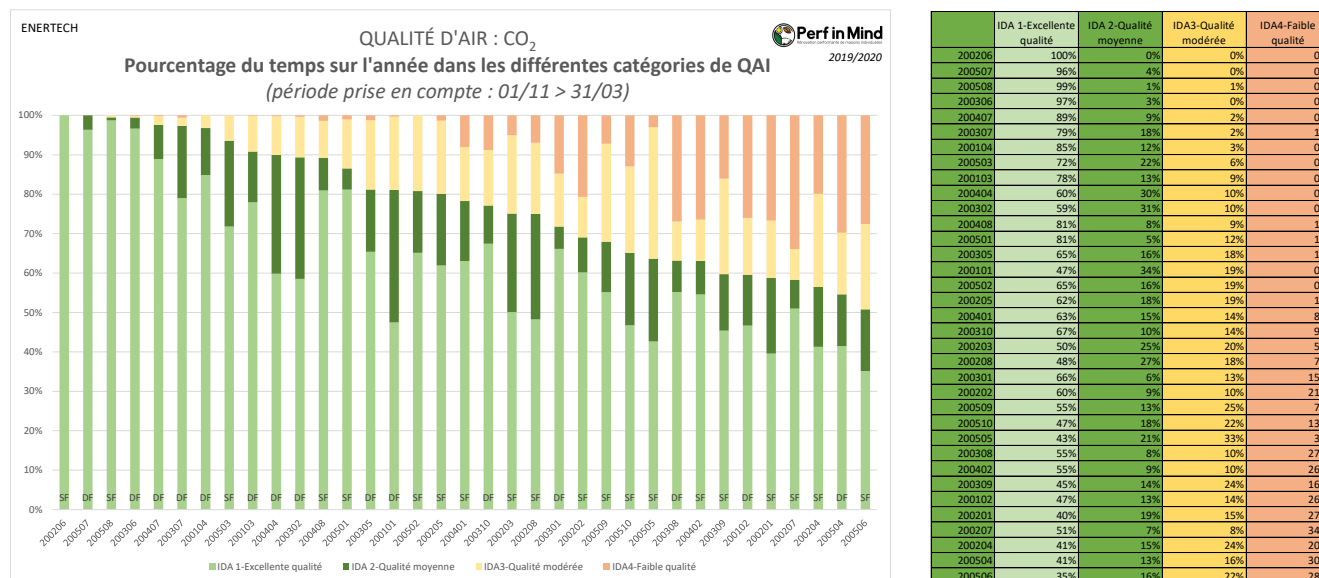


Figure 217 : Pourcentage du temps sur l'année dans les différentes catégories de QAI du 01/11 au 31/03

Cette moyenne cache cependant des réalités différentes par exemple pour les logements de très bonne qualité d'air :

- Le logement 200206 qui a la meilleure qualité d'air est 100 % du temps en qualité excellente, mais il s'agit d'un logement quasiment inoccupé pendant la période de mesure ;
- Le second logement avec la meilleure qualité (200507) est occupé mais bénéficie d'un renouvellement d'air anormalement élevé (0,81 vol/h) ;
- Le logement 200508 a changé l'implantation de sa sonde (dans un placard à l'entrée), ce qui perturbe la mesure.

Inversement, le logement avec la qualité d'air la plus faible est seulement dans les niveaux moyenne et excellente qualité durant 51% du temps à cause de son renouvellement d'air faible (0,13 vol/h).

Etant donné que les capteurs ont été installés dans les chambres, ce sont les périodes d'occupation des chambres qui comptent réellement. L'exercice de classement a donc été refait pour les logements en se concentrant sur la période de 00h00 à 05h00.

En moyenne, les logements sont en qualité moyenne voir excellent durant 58% des nuits en hiver Certains logements sont plus de 90% du temps dans ce niveau de qualité (en dehors de logements inoccupés) tandis que le logement avec la qualité d'air la plus faible n'arrive jamais dans ce niveau de qualité.

En moyenne les logements équipés de ventilations simple flux sont en excellente ou bonne qualité durant 52% des nuits contre 66% pour les ventilations double flux. Cependant, compte tenu des écarts de débits importants par rapport au taux de renouvellement d'air attendus avec ces différents types de ventilation (voir §3.1.3, les ventilations double flux sont souvent en sous-débit et certaines ventilations simple flux

sont en sur-débit) cette tendance à une meilleure qualité d'air en double flux est atténuée sur les maisons suivies. C'est pourquoi nous observerons par la suite la corrélation avec le taux de renouvellement d'air mesuré.

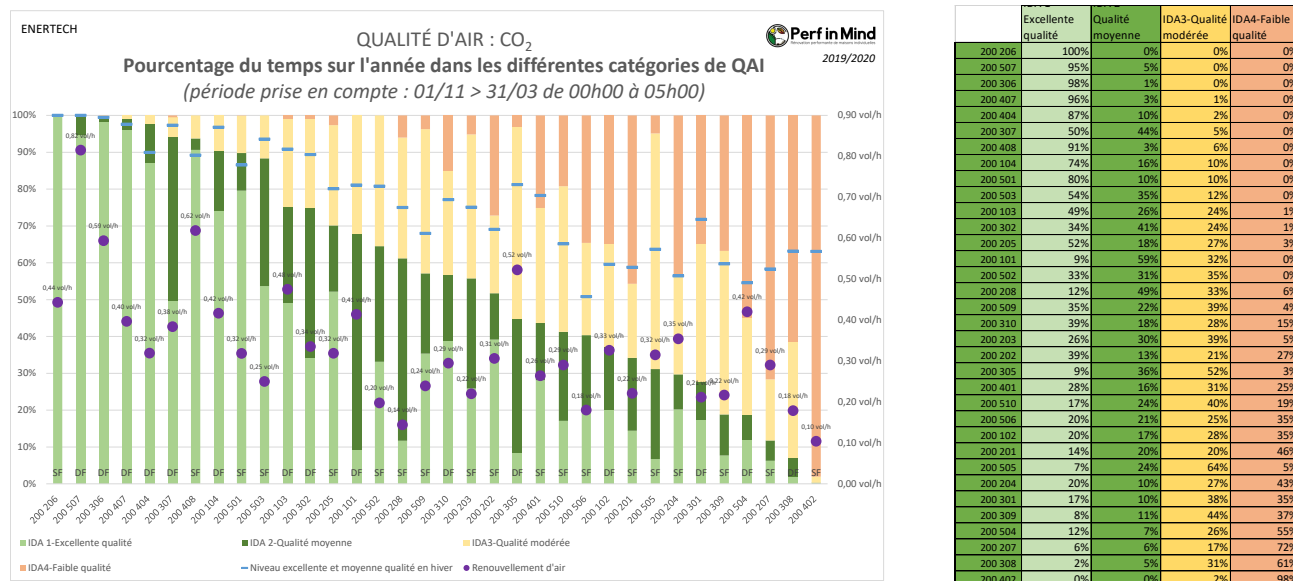


Figure 218 : Qualité d'air – Pourcentage du temps sur l'année dans les différentes catégories de QAI du 01/11 au 31/03 de 00h00 à 05h00

Nous allons donc tenter de corréler la qualité d'air avec le taux de renouvellement d'air. Cet exercice comporte des limites, car :

- On ne connaît pas l'occupation réelle des chambres ;
- On ne connaît pas le taux de renouvellement d'air spécifique à chaque chambre (pour les ventilation double flux c'est possible mais pas pour les simple flux) ;
- On ne connaît pas le volume des chambres (plus l'espace est confiné plus la concentration va monter).

Cette comparaison permet cependant d'avoir des ordres de grandeurs qui deviennent représentatifs de la réalité avec la taille de l'échantillon.

La Figure 219 ci-dessous présente la corrélation entre le taux de renouvellement d'air mesuré et la concentration moyenne de CO2 pendant la nuit. On remarque que les courbes de tendance (pointillés bleu et orange) en simple flux et en double flux sont quasiment identiques. Ainsi plus que le type de ventilation c'est donc le taux de renouvellement d'air effectif qui détermine la qualité d'air, ce qui s'explique par les débits non-conformes aux valeurs attendues en simple et double flux.

En revanche, tout type de ventilation confondus, **la corrélation entre taux de CO2 et taux de renouvellement d'air est assez bonne** : on peut donc affirmer que le taux de renouvellement d'air assuré par la ventilation contribue à la qualité d'air intérieur : **plus le renouvellement d'air est élevé, plus la qualité d'air est bonne.**

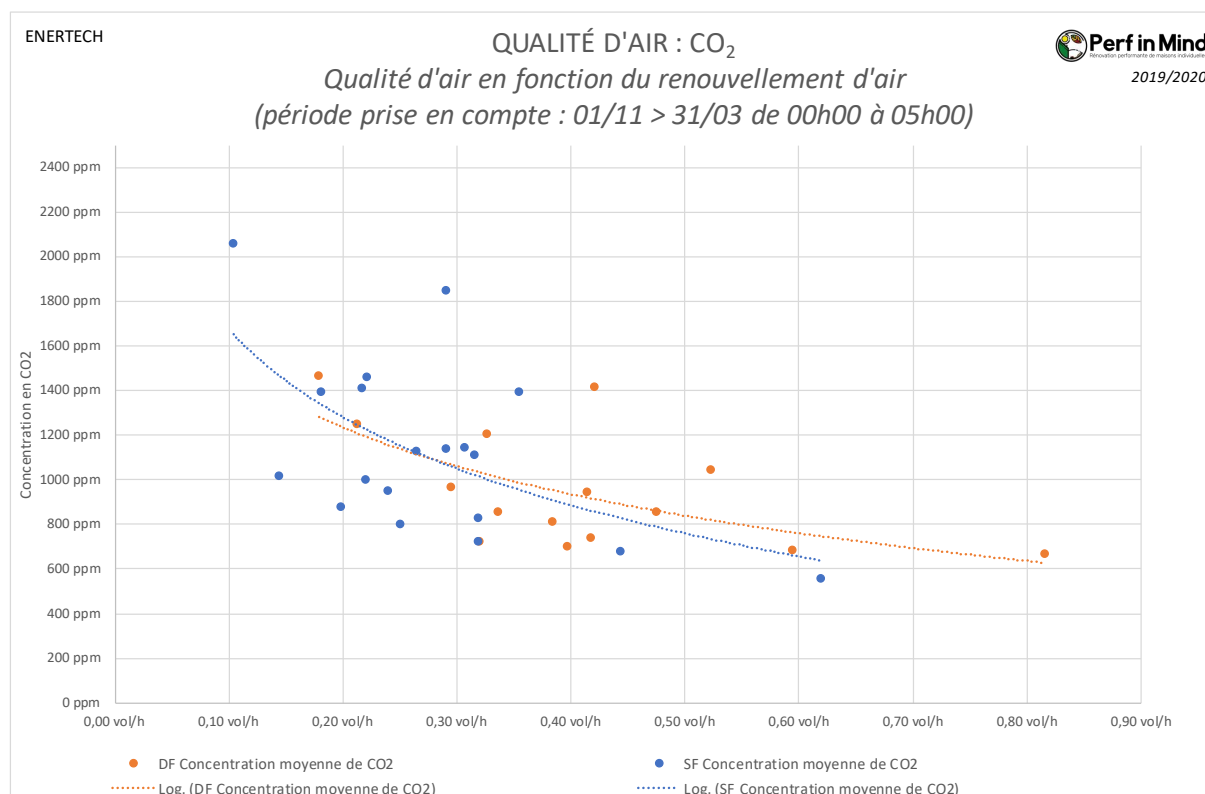


Figure 219 : Qualité d'air en fonction du taux de renouvellement d'air en taux de CO₂ moyen pendant la nuit.

On peut également exprimer ces résultats en pourcentage du temps nocturne où la qualité d'air est moyenne ou excellente :

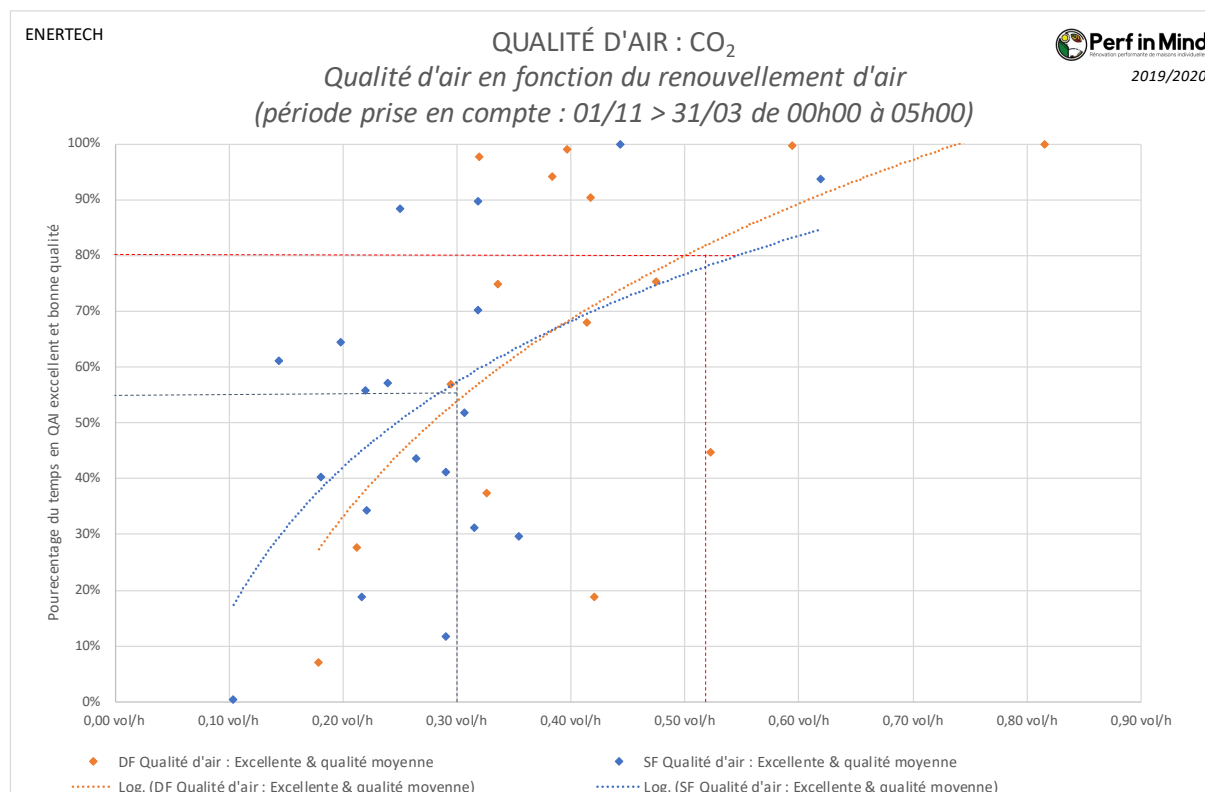


Figure 220 : Qualité d'air en fonction du taux de renouvellement d'air en % du temps nocturne où la qualité d'air est moyenne ou excellente.

Ainsi si on souhaite être durant 80% du temps en qualité d'air moyenne ou excellente, il faudrait un taux de renouvellement d'air de 0,5 vol/h, soit le niveau de renouvellement d'air attendu en simple flux autoréglable ou en double flux, mais pas celui attendu en ventilation hygroréglable. A 0,3 vol/h, soit le taux attendu en simple flux hygroréglable, la qualité d'air n'est moyenne ou excellente que 55% du temps environ.

9.2 Polluants de l'air intérieur

Méthodologie pour le suivi de paramètres propres à la qualité de l'air

Les campagnes de mesures ont été effectuées **pendant une semaine**, en **période de chauffe** des logements. Deux balises NEMo ont été utilisées dans un premier temps pour effectuer les campagnes de mesures. Chacun des occupants **du suivi « avancé »** a reçu par la poste un colis contenant la balise NEMo et les instructions pour son fonctionnement. A la fin de la semaine de mesures, l'occupant a reçu par mail un bordereau retour afin de renvoyer la balise à MEDIECO par la poste.



Figure 221 : Exemple de mise en œuvre de la balise NEMo chez un participant.

Pour le bon fonctionnement de l'opération, chaque occupant a été contacté afin de lui expliquer le projet dans sa globalité, le protocole de mesures, de vérifier l'adresse postale et l'ensemble des coordonnées (mail et téléphone). Lorsque ces différents paramètres étaient validés, une date estimative de réception du colis a été donnée aux occupants. Lors de la réception du colis, le propriétaire se chargeait de mettre en fonctionnement la balise à l'aide de la notice présente dans le colis et de positionner cette dernière au centre de la pièce principale. Suite à cette manipulation le propriétaire contactait MEDIECO afin de vérifier le bon fonctionnement de la balise grâce à la plateforme en ligne. En cas de difficultés MEDIECO assistait par téléphone le propriétaire. Un bon cadeau a été remis à chaque ménage concerné pour le remercier de sa participation active.

Les balises NEMo ont permis le suivi des polluants suivants :

- Les composés organiques volatils (COV), légers et totaux,
- Les particules fines (PM2,5 et PM10),

- Et le radon (dans 29 logements).

L'enregistreur de la qualité de l'air intérieur fonctionne par radio fréquence via un concentrateur NEMOconnect qui permet le rapatriement des données via la passerelle internet NEMO cloud. L'acquisition de données est réalisée en continu sur la semaine de mesure.

Les résultats mesurés ont également été croisés avec les **réponses au questionnaire** portant sur le ressenti et les pratiques liées à la qualité d'air intérieur.

En fin de projets, et en raison du retard pris dans l'expérimentation, des balises supplémentaires ont été fournies par MEDIECO afin de pouvoir finir plus rapidement la campagne de mesures. Les dernières campagnes ont été effectuées sur la période de printemps/été 2021 afin d'avoir des données interprétables avant la fin du projet.

Sur les 40 logements ayant bénéficié d'un suivi avancé, 5 n'ont pu être instrumentés. Un propriétaire a changé de coordonnées et dans les 4 autres logements, les stations de mesures ont eu un défaut d'enregistrement. Pour deux logements les résultats n'ont pas été réceptionnés à temps pour l'interprétation des résultats. Les résultats sont donc présentés sur **33 logements**.

L'analyse de la qualité d'air maison par maison a fait l'objet d'une fiche de résultats individuelle qui est disponible sur les fiches opérations de [l'Observatoire BBC d'Effinergie](#), rubrique « Qualité de l'air » (voir exemple ci-dessous).

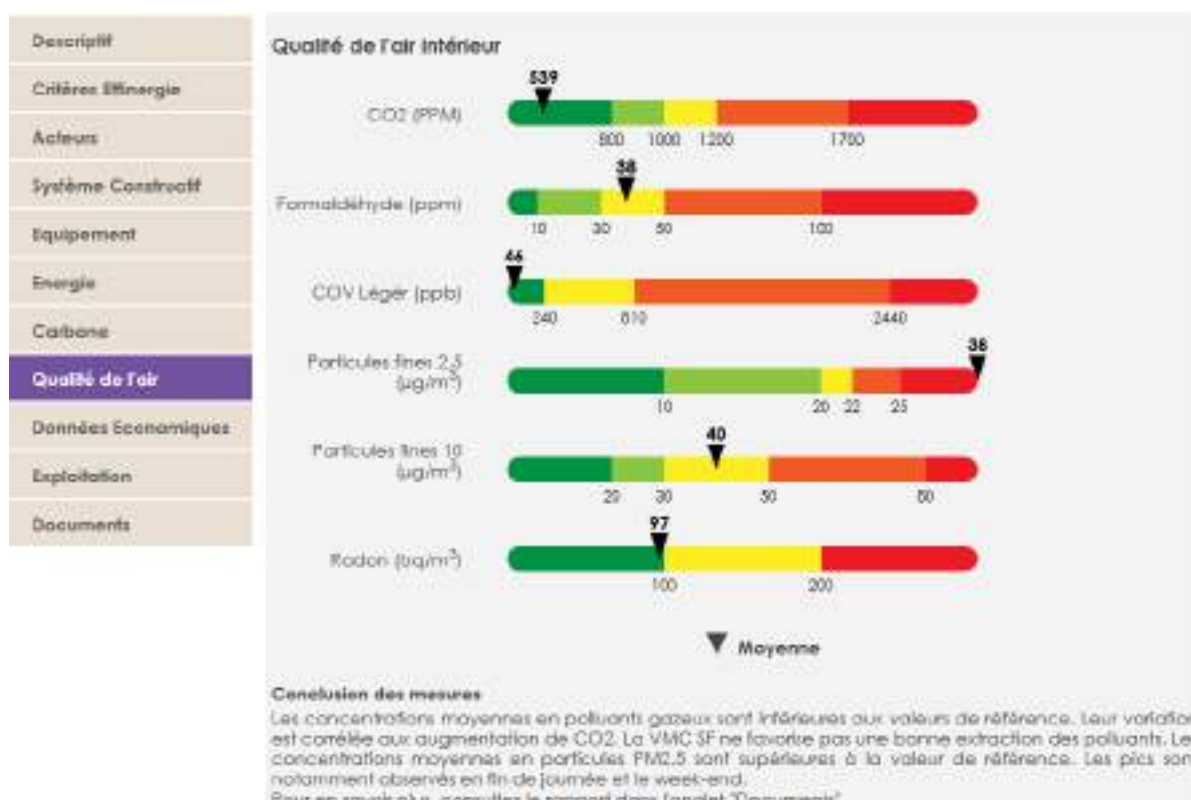


Figure 222 : Exemple de fiche individuelle de résultats sur la qualité d'air intérieur.

9.2.1 COV – Composés organiques volatils

L'acronyme « **composés organiques volatils** » désigne un ensemble de plus de 900 substances appartenant à plus de vingt grandes familles chimiques contenant toutes au moins l'élément carbone. Leur point commun est de s'évaporer à la température ambiante et d'être présents à l'état gazeux dans l'air.

L'appellation « **composés organiques volatils totaux** » ou **COVT** regroupe tous les composés qui ont de 6 à 16 atomes de carbone.

Les **composés organiques volatils légers** ou **COVL** correspondent au formaldéhyde, à l'acétaldéhyde, à l'acroléine et l'éthanol. Il s'agit des composés dont la chaîne carbonée comprend moins de 3 atomes de carbone.

Selon la nature des substances, leur quantité, leur association, les effets sanitaires diffèrent allant de l'inconfort olfactif à des irritations de la peau et des muqueuses oculaires et respiratoires. Des maux de tête, de la fatigue, des troubles neurologiques, des nausées et des vomissements peuvent également survenir. Certains composés ont aussi des potentialités cancérogènes.

COV totaux

COVT (ppm)				
< 0,15	De 0,15 à 0,4	De 0,4 à 1,3	De 1,3 à 4,3	> 4,3

Figure 223 : Tableau des valeurs seuils utilisés pour l'analyse des COVT.

Les seuils sont ceux donnés par le fabricant de l'appareil de mesure ETHERA. Convertis dans les unités correspondantes, ces seuils sont très proches des valeurs de référence sanitaires pour ces polluants.

Les résultats pour les COVT ont été enregistrés sur l'ensemble des 33 logements. Les résultats montrent :

- Dans 19 logements, soit **57 % de l'échantillon**, les **concentrations en COVT sont négligeables**, inférieures à 0,15 ppm (partie par million, soit 0,15 molécule de COVT pour un million de molécules dans l'air). Ceci qualifie une qualité d'air intérieur très satisfaisante, qui est cohérente avec les réponses aux questionnaires indiquent que 14 des 19 occupants sont satisfaits ou très satisfaits de la qualité de l'air dans leur logement. Sur les 19 personnes interrogées, 16 ne mentionnent pas de problèmes d'odeurs persistantes depuis les travaux de rénovation.
- 12 logements (34 %) avec des valeurs moyennes comprises entre 0,15 et 1,3 ppm.
- 1 logement avec des valeurs supérieures à 1,3 ppm. Ce logement atteint la valeur moyenne de 1,8 ppm. Dans ce logement, les concentrations en COV totaux et COV légers augmentent de façon nette et régulière et sont corrélées à une diminution de la concentration en particules fines. Cela met en évidence un éventuel dysfonctionnement du système de ventilation en fin de semaine.

NB : Les concentrations de COVT étant globalement faibles, la corrélation avec le renouvellement d'air n'est pas pertinente.

Conclusion : l'analyse des COVT montre une majorité de logements (57 %) présentant une concentration moyenne en COVT négligeable sur la semaine de mesure.

Un des logements présente une teneur moyenne de 1,8 ppm. Ce logement dispose d'un système de renouvellement d'air en simple flux avec un dysfonctionnement probable en fin de semaine de mesures.

COV légers

Tableau 1 : Valeurs seuils utilisés pour l'analyse des COVL

COVL (ppb)			
<240	De 240 à 810	De 810 à 2440	>2440

Figure 224 : Tableau des valeurs seuils utilisés pour l'analyse des COVL.

Les seuils sont ceux donnés par le fabricant de l'appareil de mesure ETHERA. Convertis dans les unités correspondantes, ces seuils sont très proches des valeurs de référence sanitaires pour ces polluants.

Concernant les COV légers, l'ensemble des logements présentent des valeurs inférieures à 432 ppb (partie par milliard, soit 432 molécules de COVL pour un milliard de molécules dans l'air). **Les valeurs sont donc globalement faibles.**

De plus, 29 logements, soit **87 %**, ont des concentrations moyennes inférieures à 240 ppb, soit des valeurs très faibles.

Concernant les 4 derniers logements, dont la valeur moyenne en COVL est comprise entre 240 et 430 ppb, les systèmes de ventilation sont les suivants : une ventilation simple flux, deux ventilations doubles-flux et une ventilation mécanique par insufflation.

Pour le logement équipé de la ventilation mécanique par insufflation et celui équipé d'une des ventilations double flux, l'accumulation de polluants est généralisée. Malgré une localisation de ces deux logements en catégorie 1, le constat est également semblable pour le radon. Cette accumulation de polluants dont les sources sont majoritairement internes au logement, interroge du bon état de fonctionnement des systèmes au moment des mesures. En effet, ces concentrations restent régulièrement élevées sans décroître au cours du temps. Le logement possédant une ventilation simple flux a une concentration moyenne en COV légers sur la semaine de 271 ppb. Cependant pour ce cas on observe un court pic de concentration le 25 décembre entre 12h30 et 15h30 qui est probablement lié aux activités des occupants. Les autres concentrations mesurées au cours de la semaine restent faibles. De même la moyenne de 432 ppm obtenue pour le logement équipé d'une ventilation double flux est due à un pic très important sur un moment ponctuel (un samedi soir) et les concentrations diminuent rapidement pendant la nuit attestant du bon fonctionnement du système de ventilation.

NB : Les concentrations de COVT étant globalement faibles, la corrélation avec le renouvellement d'air n'est pas pertinente.

Conclusion : l'analyse des COV légers montre une majorité de logements (87 %) présentant une concentration moyenne en COVL très faible, inférieure à 240 ppb.

Dans deux logements, les valeurs plus élevées sont engendrées par des pics d'émissions ponctuels liés aux activités des occupants. Ces pics sont rapidement dissipés et témoignent du bon fonctionnement du système de ventilation.

Enfin pour les deux derniers logements, nous nous interrogeons sur le bon fonctionnement des systèmes de ventilation car les concentrations en COVL sont constantes et moyennes au cours du temps.

9.2.2 PM – Particules fines

Les particules fines sont un mélange de substances organiques et minérales, solides et/ou liquides en suspension dans l'air. Une des principales sources est la combustion (fumée de tabac, encens, bougies, trafic routier, etc.). Les effets toxicologiques dépendent du potentiel de pénétration dans les voies respiratoires et leur passage dans le sang. Ils sont très élevés pour les particules de diamètre inférieur à 3 μm et sont encore majorés pour les particules très fines de diamètre inférieur à 1 μm . Les impacts sanitaires majeurs de l'exposition aux particules sont : asthme, bronchite chronique obstructive, cancer du poumon, accident cardiovasculaire.

PM _{2,5} $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
<10	De 10 à 20	De 20 à 22	De 22 à 25	>25
PM ₁₀ $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
<20	De 20 à 30	De 30 à 50	De 50 à 80	>80

Figure 225 : Tableau des valeurs seuils utilisés pour l'analyse des PM_{2,5} et des PM₁₀.

Les seuils sont ceux donnés par le fabricant de l'appareil de mesure ETHERA. Convertis dans les unités correspondantes, ces seuils sont très proches des valeurs de référence sanitaires pour ces polluants.

Sur les 33 logements instrumentés, un seul logement a connu un dysfonctionnement de la station de mesure au cours de la semaine. Les résultats sont donc présentés sur 32 logements.

Les résultats pour les particules fines sont très satisfaisants dans l'ensemble des logements instrumentés.

Concernant les PM₁₀ sur les 32 logements instrumentés, **un seul logement** présente une concentration moyenne de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ce logement est situé **à proximité d'un échangeur autoroutier** et est équipé d'un système de ventilation **simple flux**.

A l'exception de ce logement, les autres habitations ont des valeurs moyennes inférieures à 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les logements respectent donc la ligne directrice de OMS qui recommande de ne pas dépasser 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Concernant les PM_{2,5}, les résultats sont semblables. La concentration la plus élevée (38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) concerne le logement situé à proximité d'un échangeur. Un second logement, possédant une ventilation double flux, affiche une concentration moyenne de 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A l'exception de ces deux logements, l'intégralité des autres logements présentent des concentrations moyennes inférieures à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Elles sont conformes à la ligne directrice de OMS qui recommande de ne pas dépasser 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Si l'on met en regard les taux de renouvellement d'air mesurés en début et fin d'année de mesure (voir §3.1.3) avec les taux de particules fines observés pendant la semaine de mesure QAI, on obtient les graphiques Figure 226 et Figure 227 suivants.

Pour les PM_{2,5} comme les PM₁₀, la corrélation au taux de renouvellement d'air est semblable pour les simple et double flux : dans les deux cas on observe une meilleure qualité d'air moyenne lorsque les renouvellements d'air sont plus importants. Surtout, **les concentrations de particules fines les plus élevées sont systématiquement observées lorsque les taux de renouvellement d'air sont faibles.**

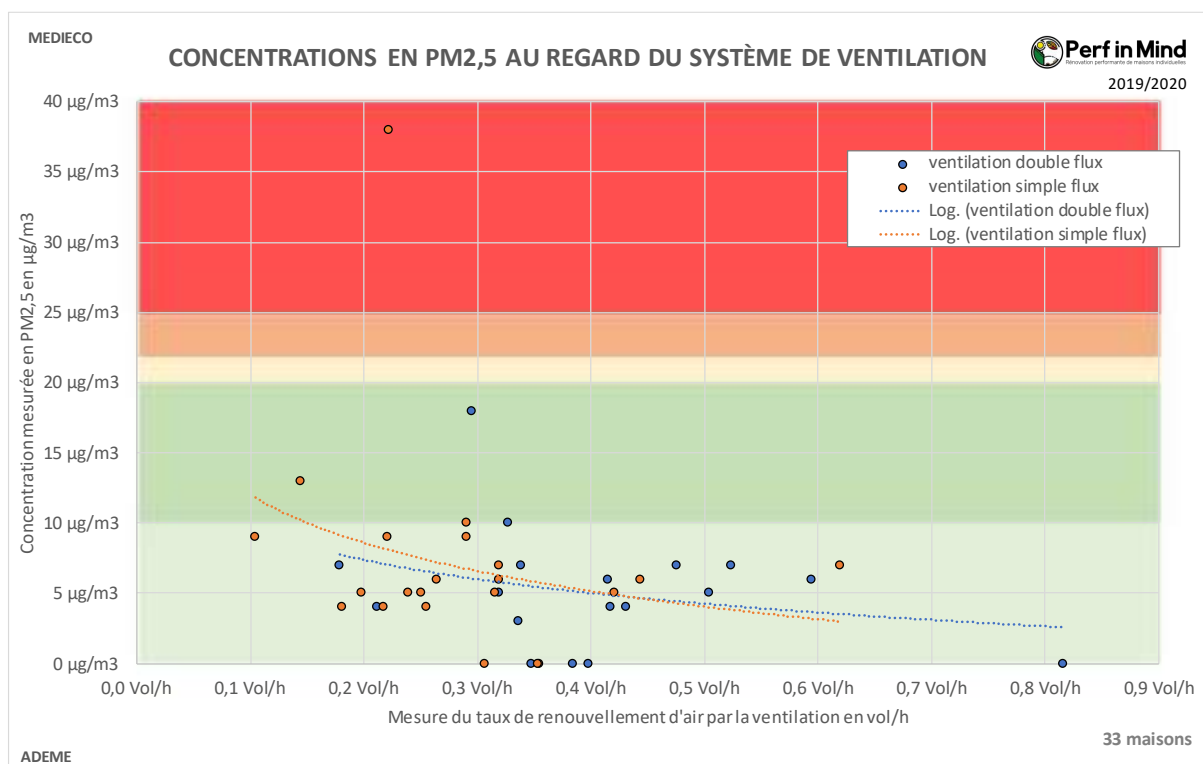


Figure 226 : Graphique des concentrations mesurées en PM_{2,5} en fonction du taux de renouvellement d'air mesuré.

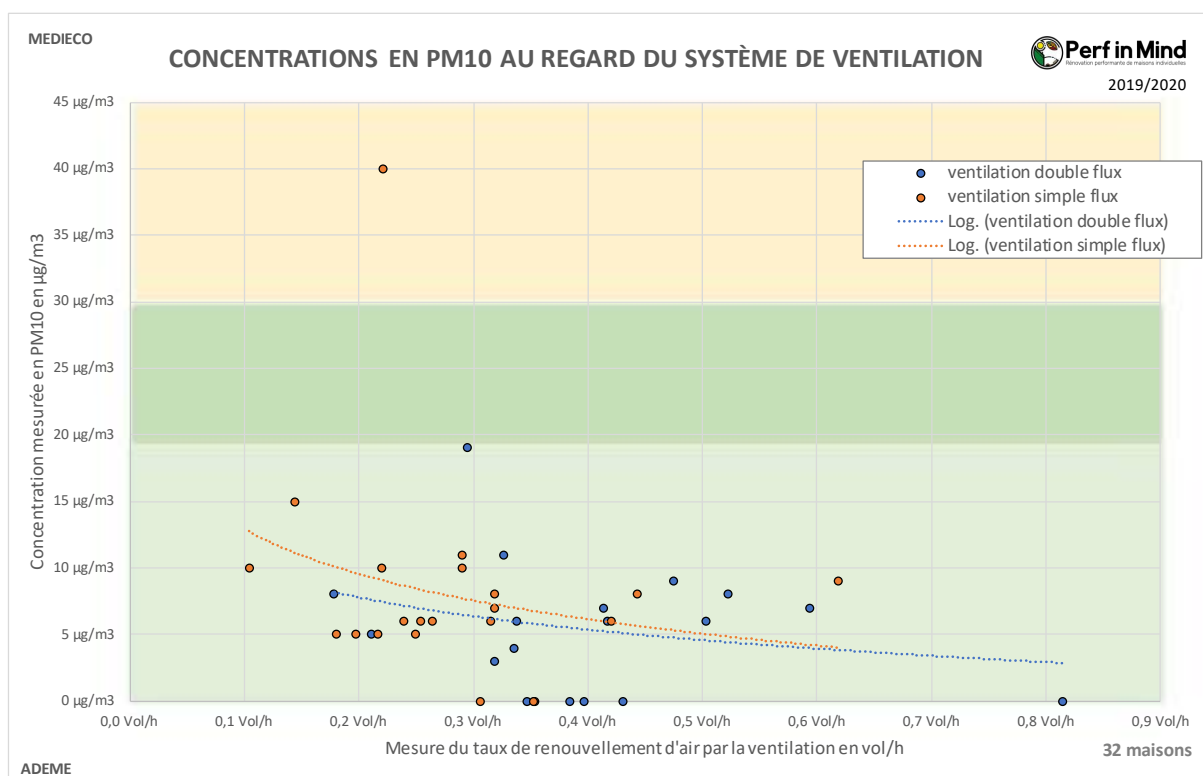


Figure 227 : Graphique des concentrations mesurées en PM₁₀ en fonction du taux de renouvellement d'air mesuré.

Conclusion : pour la grande majorité de logements instrumentés, les concentrations en particules fines respectent les lignes directrices de l'OMS. Pour le logement à proximité de l'axe autoroutier, la

ventilation simple flux ne permet pas de filtrer suffisamment les particules, d'où les niveaux élevés en PM_{10} et en $PM_{2,5}$. Pour le deuxième logement dépassant la valeur de l'OMS en $PM_{2,5}$, possédant pourtant une ventilation double flux il serait intéressant de vérifier les filtres de la ventilation, car même si les valeurs en PM_{10} respectent la ligne directrice de l'OMS de $20 \mu g/m^3$, elles restent très proches de cette valeur avec une concentration moyenne de $19 \mu g/m^3$. On observe une corrélation entre le taux de renouvellement d'air de la ventilation et les concentrations de particules fines.

9.2.3 Radon

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle. Il est issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre notamment dans les roches volcaniques et granitiques. On le retrouve sur tout le territoire à différentes concentrations de quelques becquerels par mètre-cube à plusieurs milliers de becquerels par mètre-cube. Sur certains secteurs, l'existence de caractéristiques particulières du sous-sol peut constituer un facteur aggravant en facilitant les conditions de transfert du radon vers la surface. Le radon est classé dans le groupe 1 (cancérogène certain) par le Centre International de Recherche sur le Cancer depuis 1987 (cancer du poumon).

On classe les communes en 3 zones d'exposition au Radon :

Connaître le potentiel radon de sa commune

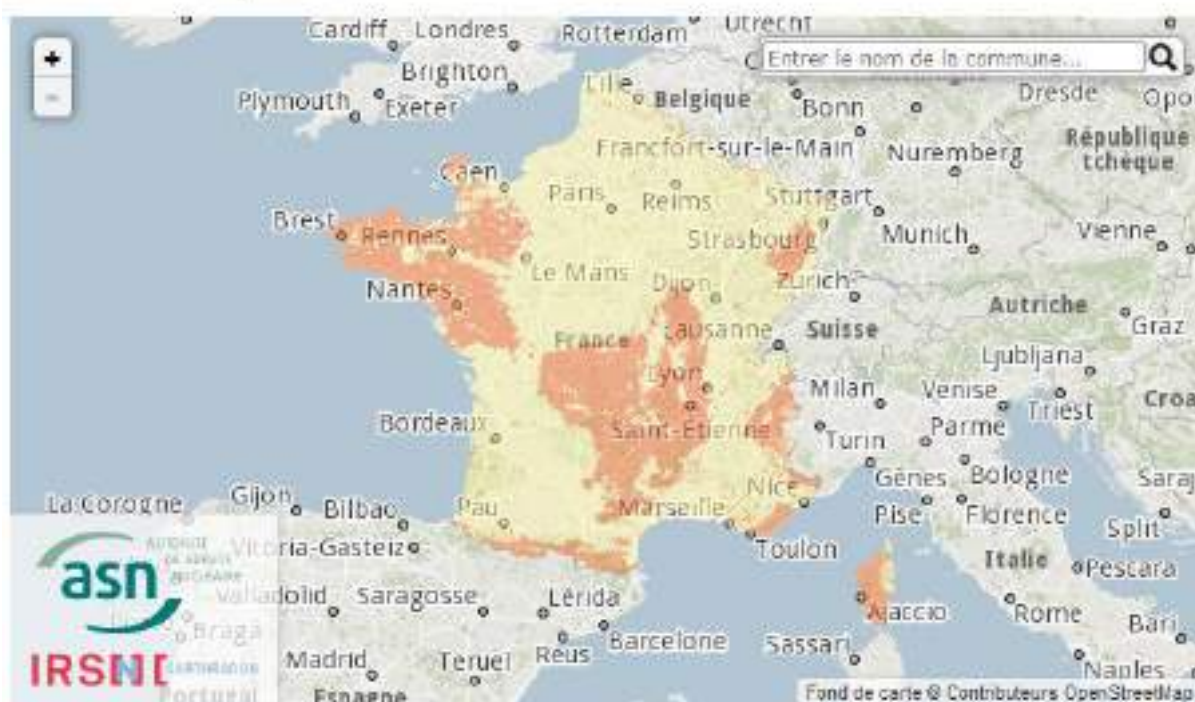


Figure 228 : Carte du potentiel Radon des communes. Source :

<https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon/Pages/5-cartographie-potentiel-radon-commune.aspx>

- Les communes à potentiel radon de **catégorie 1** sont celles localisées sur les formations géologiques présentant les teneurs en uranium les plus faibles.
- Les communes à potentiel radon de **catégorie 2** sont celles localisées sur des formations géologiques présentant des teneurs en uranium faibles mais sur lesquelles des facteurs

géologiques particuliers peuvent faciliter le transfert du radon vers les bâtiments (failles, ouvrages minier souterrain).

- Les communes à potentiel radon de **catégorie 3** présentent des formations géologiques dont les teneurs en uranium sont estimées plus élevées comparativement aux autres formations.

Radon Bq.m ³		
<100	De 100 à 200	>200

Figure 229 : Tableau des valeurs seuils utilisés pour l'analyse du radon.

Les seuils sont ceux donnés par le fabricant de l'appareil de mesure ETHERA. Convertis dans les unités correspondantes, ces seuils sont très proches des valeurs de référence sanitaires pour ces polluants.

Sur les 33 logements avec des résultats, 29 ont fait l'objet d'une mesure de radon.

Parmi les 29 logements instrumentés, 15 logements sont situés **en zone 1** (exposition la plus faible). Sur ces formations, une grande majorité de bâtiments présente des concentrations en radon faibles. Les résultats de la [campagne nationale de mesure](#) en France métropolitaine montrent ainsi que 20 % des bâtiments dépassent 100 Bq.m³ ; niveau recommandé par l'OMS en 2009, et moins de 2 % dépassent 300 Bq.m³, niveau maximum indiqué par l'OMS (2009).

Sur ces 15 logements suivis ici en zone 1, 10 présentent une valeur moyenne inférieure à 100 Bq.m³ (67 % de l'échantillon), 3 ont une valeur comprise entre 100 et 300 (soit 20 %) (dont une maison avec une valeur très proche des 100 Bq.m³) et les 2 derniers logements affichent une concentration supérieure à 300 Bq.m³ (13 %). Ces résultats sont donc comparables à ceux de la campagne nationale de mesure.

Le logement présentant la valeur de 372 Bq.m³ est équipé d'une VMI, système de **ventilation mécanique par insufflation** qui devrait limiter les valeurs du radon grâce à la mise en surpression du logement. Le propriétaire a d'ailleurs indiqué que le risque radon avait été intégré dans les travaux réalisés. Ce résultat combiné à des teneurs relativement élevés sur les autres paramètres **interrogent sur le bon fonctionnement du système de renouvellement d'air** au moment des mesures.

Le deuxième logement dépassant la valeur de 300 Bq.m³ (398 Bq.m³) est situé en zone 1 mais à proximité de zones à fort potentiel radon ce qui peut expliquer les valeurs élevées. Par ailleurs les valeurs des autres paramètres sont également élevées, interrogeant sur le bon fonctionnement du système de ventilation double flux. Les propriétaires de ces deux logements ont déclaré connaître le risque radon.

Sur les 29 logements instrumentés, 7 sont situés **en zone 2** (teneur des sols en uranium faible mais des facteurs géologiques particuliers peuvent faciliter le transfert du radon vers les bâtiments). Sur les 7 logements, 4 présentent des teneurs inférieures à 100 Bq.m³, 2 présentent une valeur autour de 100 Bq.m³ et 2 dépassants les 300 Bq.m³ (313 et 427 Bq.m³).

Ces deux logements disposent d'une **ventilation simple flux contribuant à une mise en dépression de la maison et donc à favoriser le transfert de ce gaz issu du sol vers l'intérieur**. La présence de ce système de ventilation et la localisation du logement en catégorie 2 sont cohérents avec les valeurs élevées obtenues. De même les deux logements avec une valeur autour de 100 Bq.m³ disposent d'une ventilation simple flux.

A contrario, 2 des 3 logements ayant des valeurs inférieures à 100 Bq.m³ sont équipés d'une ventilation double flux. En zone 2, le type de système de ventilation installé dans les logements semble donc avoir un impact sur la concentration en radon des logements.

Sur ces 7 logements en zone 2, trois propriétaires connaissaient la problématique radon mais un seul a intégré la problématique dans les travaux de rénovation. Ce dernier logement est d'ailleurs équipé d'une ventilation double flux et présente une concentration inférieure à 100 Bq.m³ (60 Bq.m³).

Enfin 5 logements sont situés **en zone 3** (exposition relativement plus élevée). Les résultats de la [campagne nationale de mesure](#) en France métropolitaine montrent que plus de 40 % des bâtiments situés sur ces terrains dépassent 100 Bq.m³ et plus de 10 % dépassent 300 Bq.m³.

A contrario ce résultat ne se retrouve pas dans l'échantillon de logement observé ici. Ce résultat peut s'expliquer par le type de ventilation. En effet 3 sur les 4 logements présentant des valeurs inférieures à 100 Bq.m³, trois disposent d'une double flux. Le seul logement dépassant la valeur seuil dispose d'une ventilation simple flux. **La ventilation double flux semble donc efficace pour maîtriser les teneurs en radon.**

Si l'on met en regard les taux de renouvellement d'air mesurés en début et fin d'année de mesure avec les concentrations de radon observées pendant la semaine de mesure QAI, on obtient le graphique suivant :

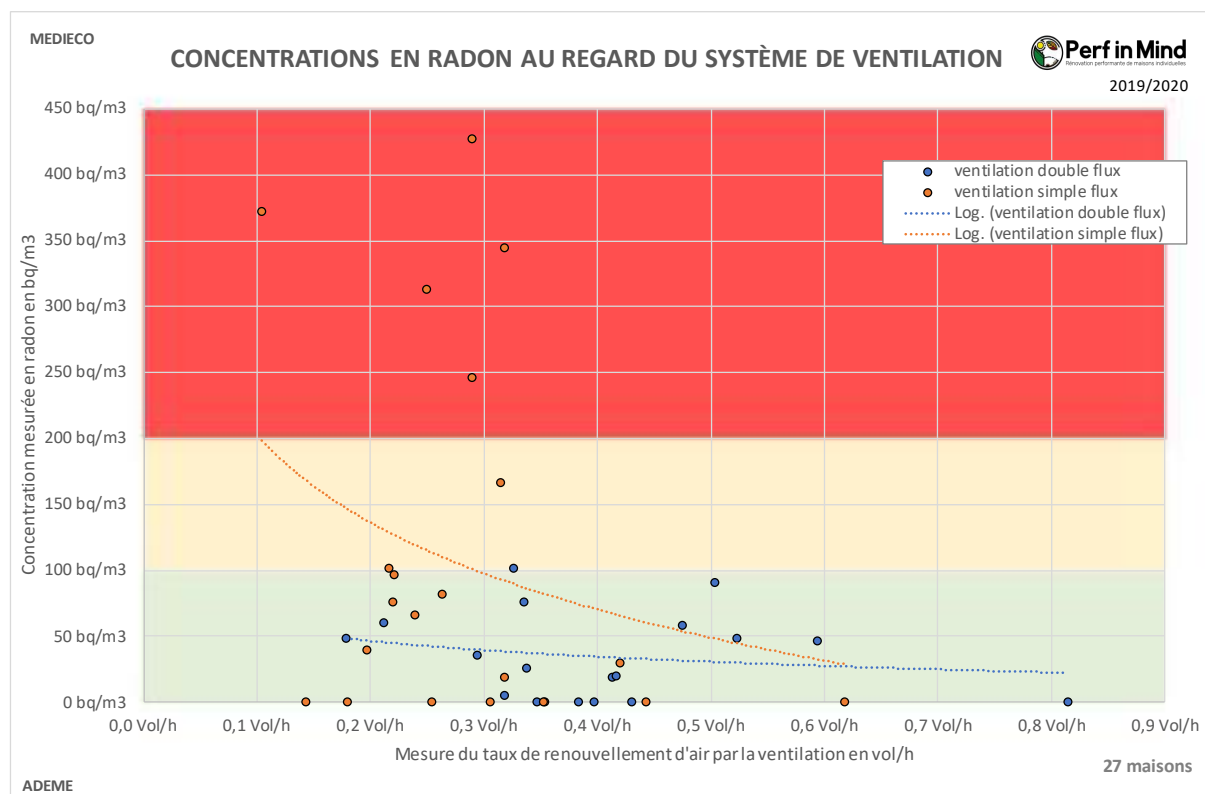


Figure 230 : Graphique des concentrations mesurées en radon en fonction du taux de renouvellement d'air mesuré.

On observe ici une courbe de corrélation sensiblement différente entre simple et double flux. En effet, la ventilation simple flux met le logement en dépression, ce qui augmente la concentration de radon, alors que la double flux maintient en principe la maison en équilibre de pression ou en légère surpression.

Par ailleurs, pour les simple flux, on note une forte corrélation entre débit de renouvellement d'air et concentration de polluant. **En particulier les valeurs élevées de concentration en radon ne sont observées que pour des taux de renouvellement d'air relativement faibles, mais correspondant aux taux normaux attendus en ventilation hygroréglable (0,3 vol/h).**

Conclusion : la ventilation joue un rôle prépondérant dans la gestion du risque radon, notamment dans les zones 2 et 3. L'utilisation d'un système de double-flux semble limiter la concentration en radon. Sur les 14 logements disposant d'une ventilation double flux, un seul présente une valeur largement supérieure à 100 Bq.m³. Sur les 7 logements avec une concentration moyenne supérieure à 100 Bq.m³, on recense 1 ventilation mécanique par insufflation, 1 double flux mais 5 simple flux.

Par ailleurs le bon fonctionnement des systèmes de ventilation est important. En effet pour les deux logements équipés d'une ventilation double flux et d'une ventilation mécanique par insufflation dépassant les 100 Bq.m³, le bon état de fonctionnement des systèmes est remis en cause car l'accumulation des polluants semble généralisée.

On observe une corrélation entre concentration de radon et renouvellement d'air. Pour un renouvellement d'air normal en simple flux hygroréglable (0,3 vol/h), des fortes concentrations en radon sont observées dans certains logements.

9.2.4 Bilan qualité de l'air

Globalement, les concentrations moyennes des différents polluants sur la semaine de mesure sont faibles.

Pour les composés organiques volatils, les moyennes hebdomadaires plus élevées sont parfois expliquées par les activités des occupants qui engendrent des pics d'émissions élevés mais ponctuels. Dans les autres cas, le bon fonctionnement du système de ventilation est souvent remis en question.

Si pour les COV, il semble difficile de retirer une conclusion de l'analyse des résultats, les mesures en radon apportent des éléments intéressants. La ventilation après une rénovation joue un rôle important dans le maintien des concentrations en radon. En effet, sur les 7 logements présentant des concentrations moyennes supérieures à 100 Bq/m³, 5 logements sont équipés d'une ventilation simple flux. Même dans les zones où le risque radon est élevé, la ventilation double flux semble efficace pour limiter les concentrations en radon dans les logements.

ANALYSE ECONOMIQUE

10 Analyse économique

Méthodologie :

L'analyse économique réalisée ici est basée sur les factures ou devis finaux reçus. Certains coûts sont également issus de bilan de plan de financement établis et communiqués par les régions.

Les **coûts induits** sont inclus dans les prix présentés ici. Par coût induits on entend notamment les prestations considérées comme coûts induits au sens des subventions et de la TVA réduite.

Certains travaux induits ont également pu être affectés par poste, lorsque le détail était connu. Ainsi par exemple lorsque nous disposions de devis détaillés nous avons affecté le coût des faux-plafonds et le cas échéant du raccordement électrique à la ventilation double flux.

Certains travaux ont été réalisés en auto-réhabilitation. Lorsque c'est le cas, et lorsqu'ils étaient connus, les coûts de matériaux ont été pris en compte. En revanche la main d'œuvre des ménages n'a pas été valorisée. Le tableau récapitulatif du [§10.7](#) identifie l'impact de l'auto-réhabilitation et des lots énergétiques non réalisés, pour relativiser la complétude des coûts présentés ici.

Nous distinguerons les coûts travaux en 3 périmètres :

- Les **6 postes de travaux** constituant une rénovation complète : isolation des murs, toitures et plancher bas, le remplacement des menuiseries, la ventilation et le système de chauffage et ECS. L'ECS solaire est incluse dans ce périmètre. Les prestations de traitement de l'étanchéité à l'air sont incluses.
- Les **autres postes liés à l'énergie** : ces travaux ne sont pas systématiquement réalisés, donc ne constituent pas un ensemble comparable entre les maisons :
 - o Le remplacement des émetteurs (radiateurs etc.) : il s'agit de travaux de maintenance lourde, qui ne sont pas directement liés à la rénovation énergétique ;
 - o La mise en place d'une installation photovoltaïque ;
 - o Le remplacement à l'identique de volets extérieurs. Lorsqu'ils étaient présents avant rénovation, il s'agit de maintenance de la maison plutôt que de rénovation énergétique. Cependant le détail du poste menuiseries n'est pas toujours connu, ainsi ce poste peut être inclus dans le poste Menuiseries.
 - o Dans certains cas, le plan de financement était d'un montant total supérieur à la somme des factures (ou devis finaux) connus. Nous avons alors affecté par défaut en « autres postes liés à l'énergie » la différence.
- Les **travaux hors énergie** : sont l'ensemble des travaux qui améliorent la qualité de la maison, mais n'apportent pas d'amélioration énergétique.

Nous présenterons en fin d'analyse la somme de ces 3 périmètres (la totalité de ce que les ménages ont dû financer), ainsi que le rappel des postes réalisés en auto-réhabilitation.

L'ensemble des coûts est présenté en € TTC.

10.1 Auto-réhabilitation

En introduction de l'analyse économique, il nous semble important de souligner que de nombreux ménages ont effectué une part des travaux eux-mêmes, en auto-réhabilitation. Le coût des matériaux n'est pas compté dans l'analyse économique qui va suivre, ni le temps investi par les particuliers.

Grâce au questionnaire rempli par l'ensemble des participants, nous avons pu qualifier globalement les travaux réalisés en auto-réhabilitation.

La Figure 231 ci-dessous présente la répartition des maisons par nombre de lots réalisés en auto-réhabilitation :

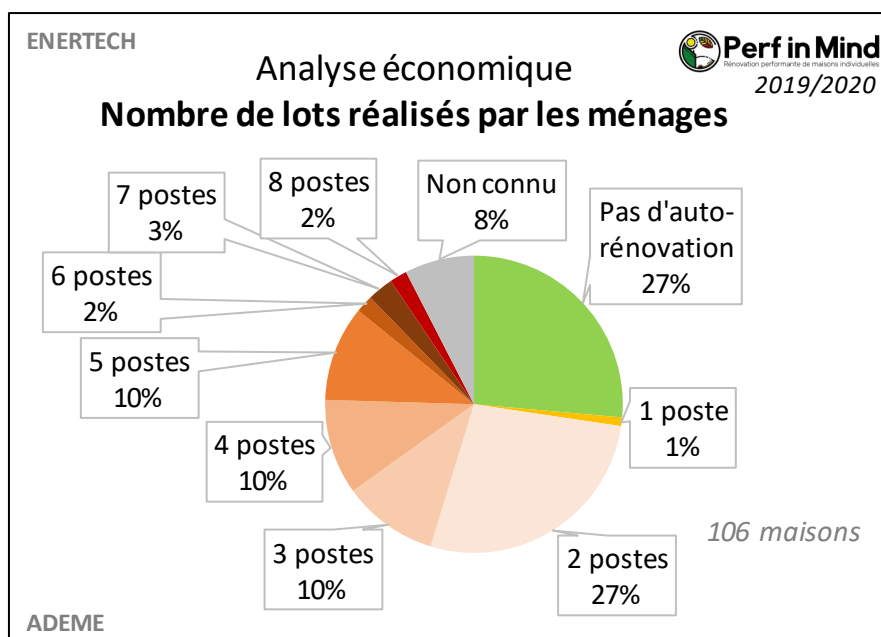


Figure 231 : Graphique du nombre de lots réalisés en auto-réhabilitations par les ménages.

On note que seuls 27% des ménages n'ont réalisé aucun lot en auto-réhabilitation, parmi lesquels les 12 ménages de l'opération EnergieSprong qui sont les locataires d'un bailleur social. La grande majorité des répondants ont réalisé ou contribué à **au moins 2 postes de travaux**, et jusqu'à 8 postes de travaux.

Les travaux réalisés étaient décrits en quelques mots-clés dans le questionnaire. Ces réponses restent peu précises, mais donnent une indication sur la nature des lots en auto-réhabilitation.

La Figure 232 ci-dessous montre que les travaux les plus souvent réalisés par les ménages sont des travaux de peinture (66 maisons) et d'aménagement (64 maisons). Si l'on regroupe les travaux décrits par les mots-clés Plomberie, équipements sanitaires, ECS et VMC, on observe que 32 ménages ont réalisé ce poste eux-mêmes. L'installation électrique a été rénovée (nous ne savons pas dans quelle proportion) par les ménages dans 29 maisons. Viennent ensuite des travaux d'isolation, de démolition et intervention sur le gros-œuvre et interventions sur la toiture.

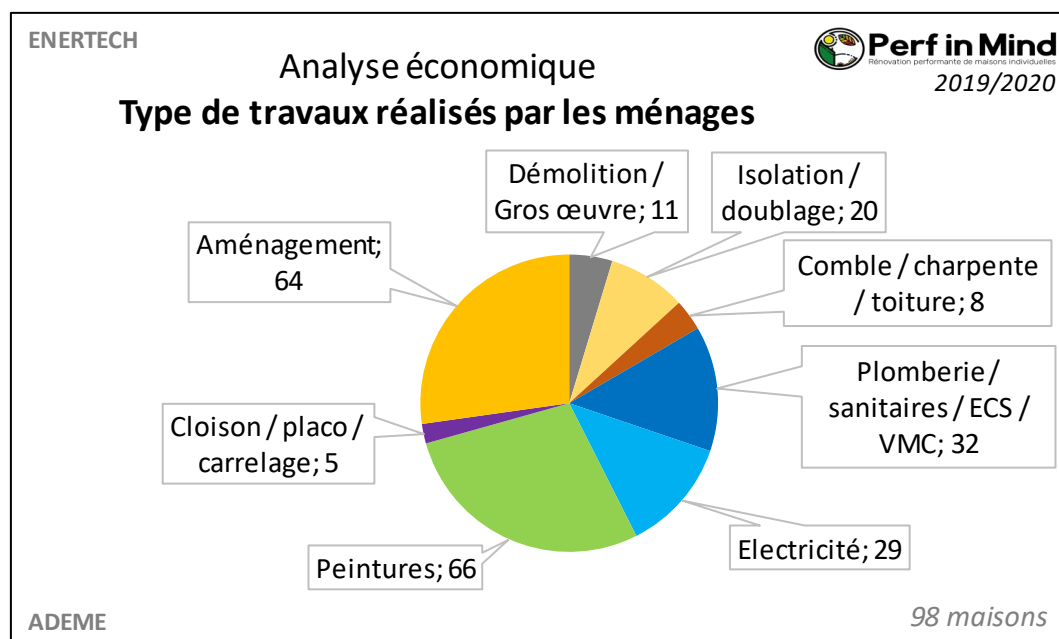


Figure 232 : Graphique du type de travaux réalisés en auto-réhabilitation.

NB : le questionnaire ne nous a pas permis de déterminer si les lots concernés ont été réalisés totalement par les ménages, ou s'ils ont réalisé une réhabilitation partielle, ou s'ils ont contribué à la réalisation du lot en coordination avec un artisan.

En tout état de cause, les coûts des matériaux achetés en direct par les particuliers sont comptés s'ils sont connus, mais **le temps passé par les ménages n'est pas compté dans l'étude qui suit.**

10.2 Amélioration de l'enveloppe

La rénovation de l'enveloppe concerne 4 lots : l'isolation des murs, le remplacement des menuiseries, l'isolation de la toiture et celle du plancher bas.

Les coûts d'isolation des murs sont présentés Figure 233.

On note que les coûts varient de 2500 €TTC environ à plus de 45 000 €TTC. En moyenne, les travaux d'ITE coûtent plus cher (moyenne : 28 000 €TTC) que les travaux d'ITI (moyenne : 16 000 €TTC).

Si l'on s'intéresse au coût au m² de mur (rapportée à la surface indiquée dans le devis si elle est connue, qui peut être supérieure à la surface déperditive de mur prise en compte dans le calcul thermique), on retrouve une variabilité importante des prix en ITE comme en ITI. La moyenne en ITE est de 159 €TTC/m², et en ITI de 87 €TTC/m².

On note le cas particulier de l'ITE en ossature bois préfabriquée de l'opération EnergieSprong, qui sort à 308 €TTC/m².

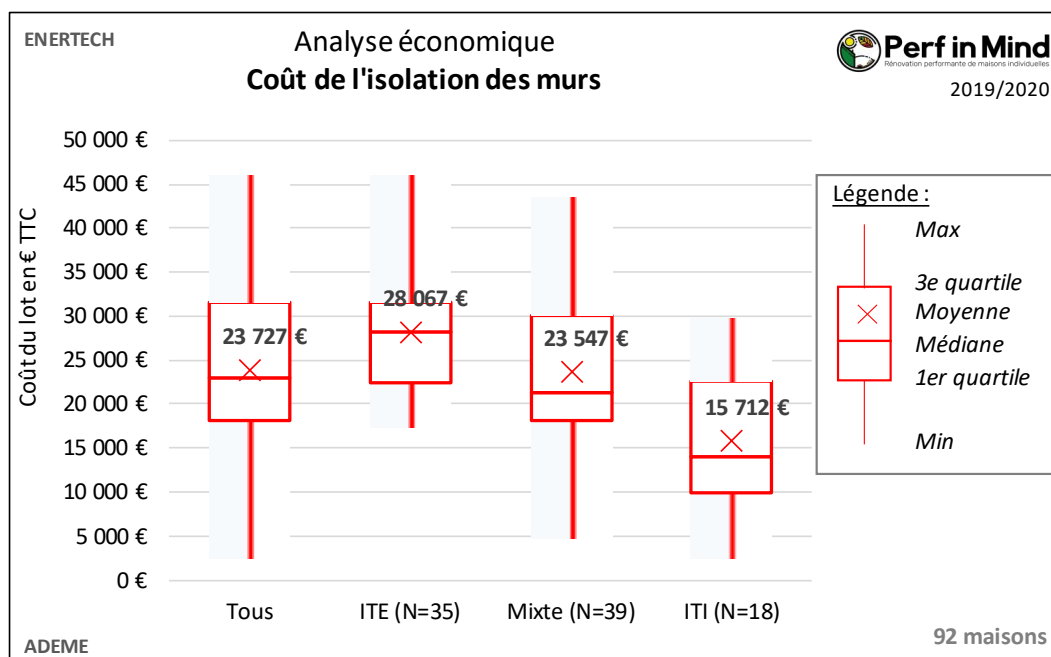


Figure 233 : Graphique des coûts d'isolation des murs.

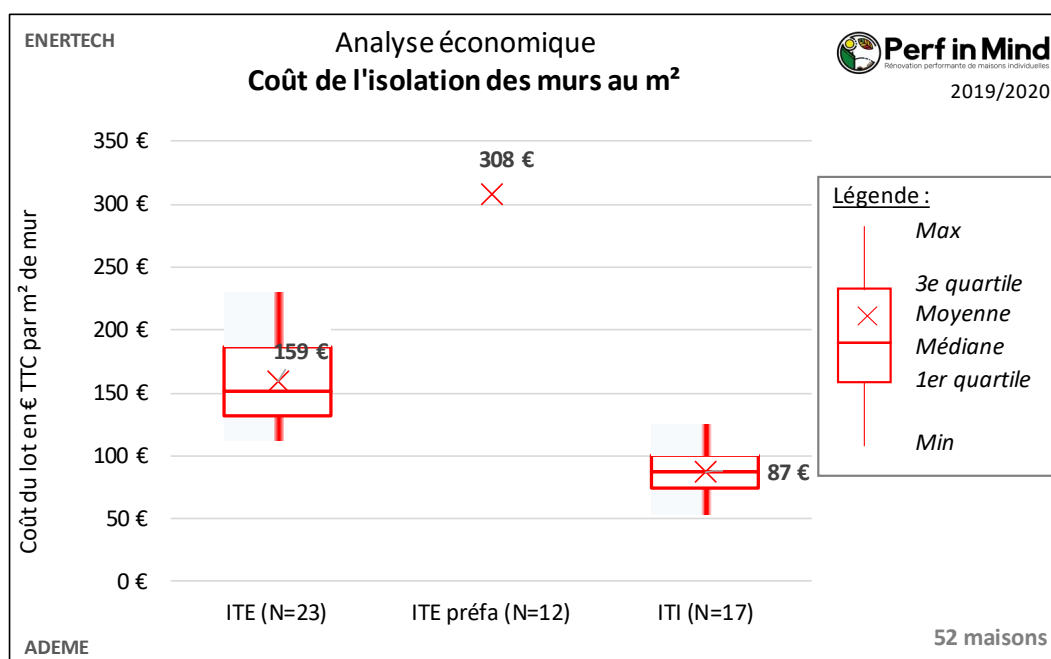


Figure 234 : Graphique des coûts d'isolation des murs, rapportés à la surface de mur du devis.

Le coût de **remplacement des menuiseries** est présenté Figure 235. Ce coût comprend dans la plupart des cas les occultations, notamment celles de type volet roulant.

La fourchette de coût est très étendue. En effet, elle commence à 0 € (menuiseries existantes conservées) et monte jusqu'à près de 35 000 € TTC.

Si l'on se concentre sur les seules opérations où la totalité des menuiseries ont été remplacées (concerne 80 maisons), le budget moyen observé est de 15 000 € TTC.

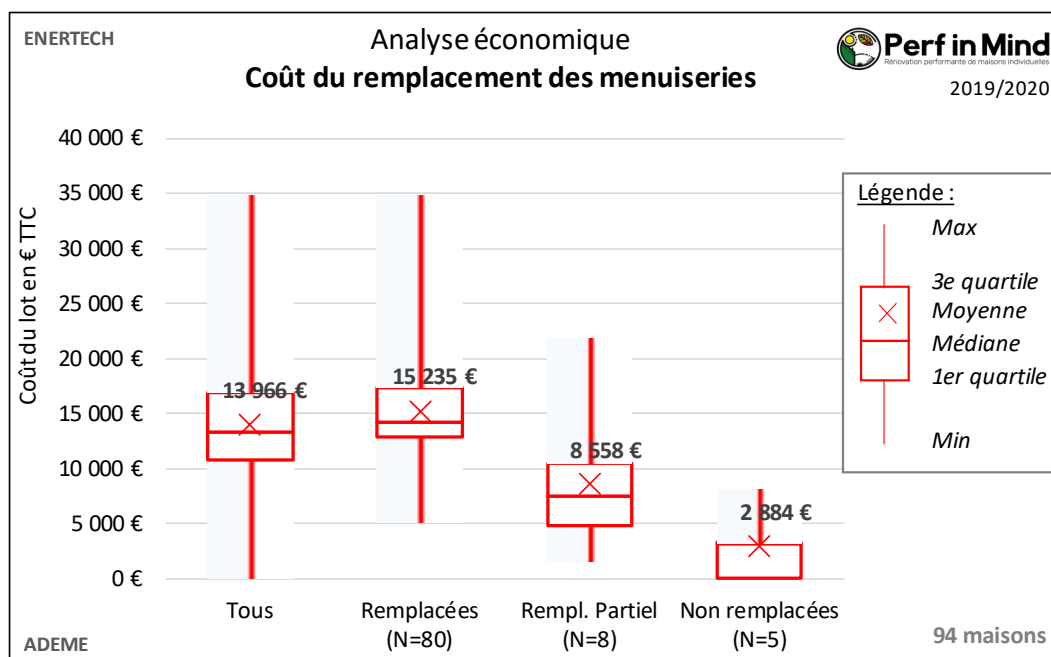


Figure 235 : Graphique des coûts de remplacement des menuiseries (et occultations).

Si l'on ne s'intéresse qu'aux opérations où la totalité des menuiseries ont été remplacées, on peut analyser le coût des menuiseries rapporté à la surface de menuiseries :

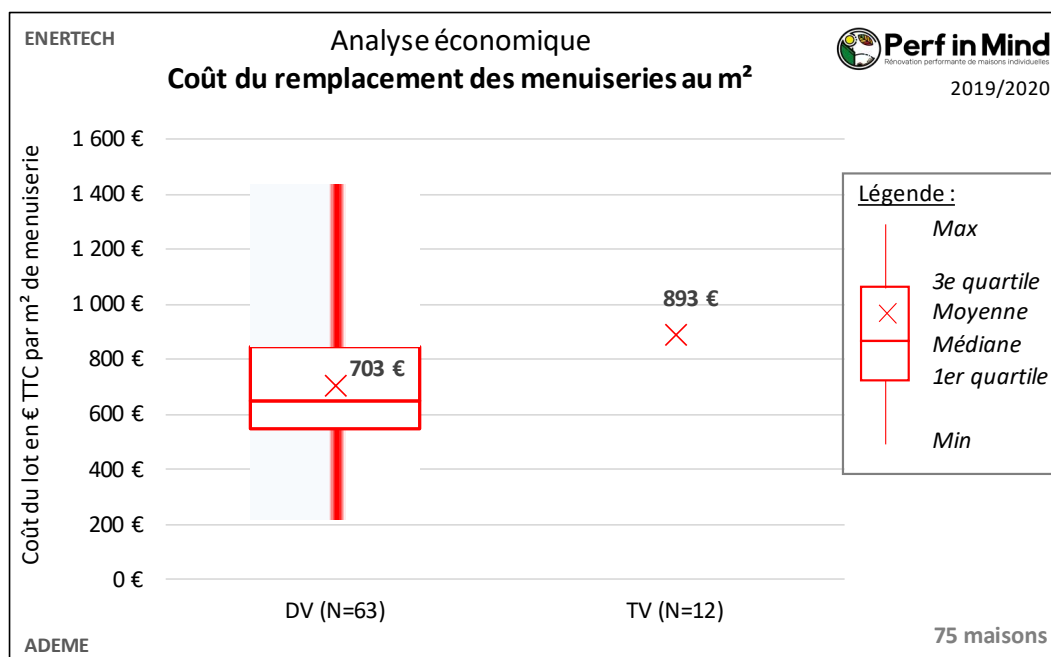


Figure 236 : Graphique des coûts de remplacement des menuiseries (et occultations) au m² de menuiseries.

On observe une très large dispersion des coûts au m², de 200 à 1400 €TTC/m².

Le coût moyen en double vitrage est de 703 €TTC/m².

Le coût surfacique du triple vitrage n'a pu être déterminé que pour les 12 maisons EnergieSprong. Il s'élève à 893 €TTC/m².

Le coût de l'isolation de la toiture est présenté Figure 237.

La dispersion est très importante, et peut être en partie expliquée si l'on distingue les techniques d'isolation :

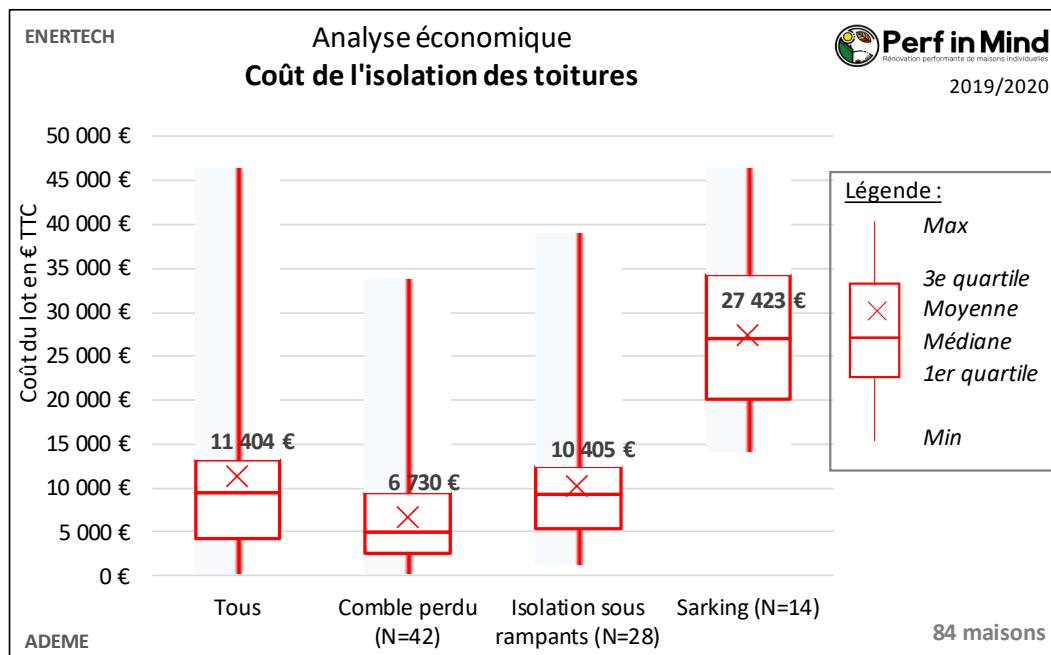


Figure 237 : Graphique des coûts d'isolation des toitures.

En moyenne, l'isolation des combles perdus sort à 6 700 €TTC, l'isolation en rampant à 10 000 €TTC, alors que l'isolation en sarking sort à plus de 27 000 €TTC.

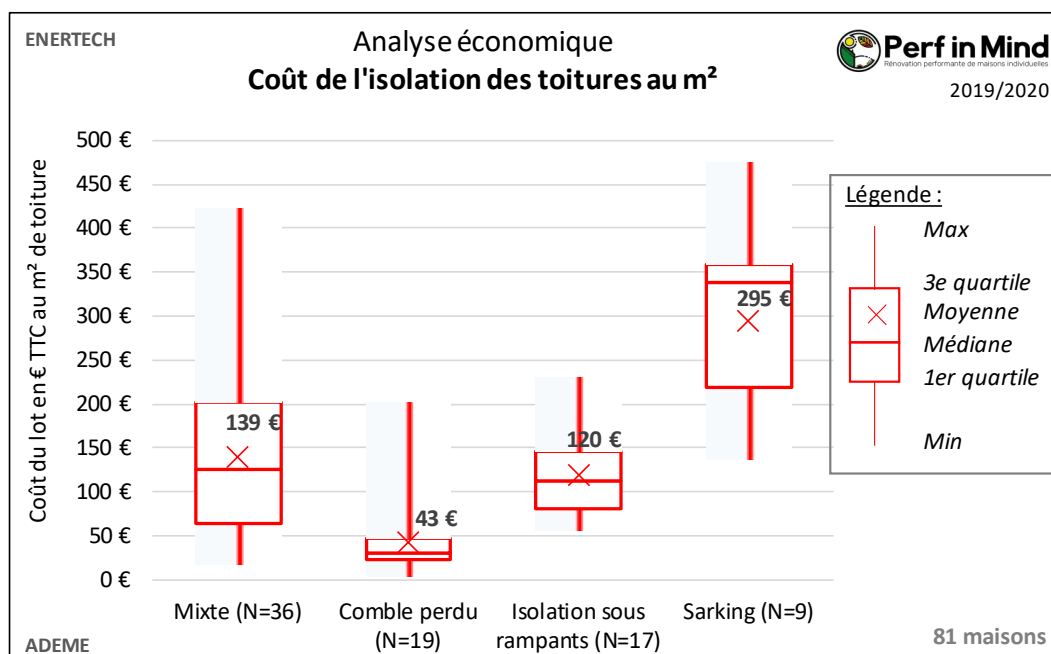


Figure 238 : Graphique des coûts d'isolation des toitures, rapporté à la surface de toiture (selon étude thermique).

Rapportés au m² de toiture, l'isolation en combles perdus coûte en moyenne 43 €TTC/m², l'isolation en rampant 120 €TTC/m², et l'isolation en sarking près de 300 €TTC/m².

Enfin, les coûts d'isolation du plancher bas sont présentés Figure 239.

Méthodologie :

Attention pour l'isolation sous chape et sous dalle, le coût de la chape et de la dalle ne sont pas inclus, car dans la plupart des cas ils étaient dans un autre lot (gros œuvre / chape) dont le détail n'était pas connu. Ceci est rappelé par l'étoile (*) dans la légende des graphiques.

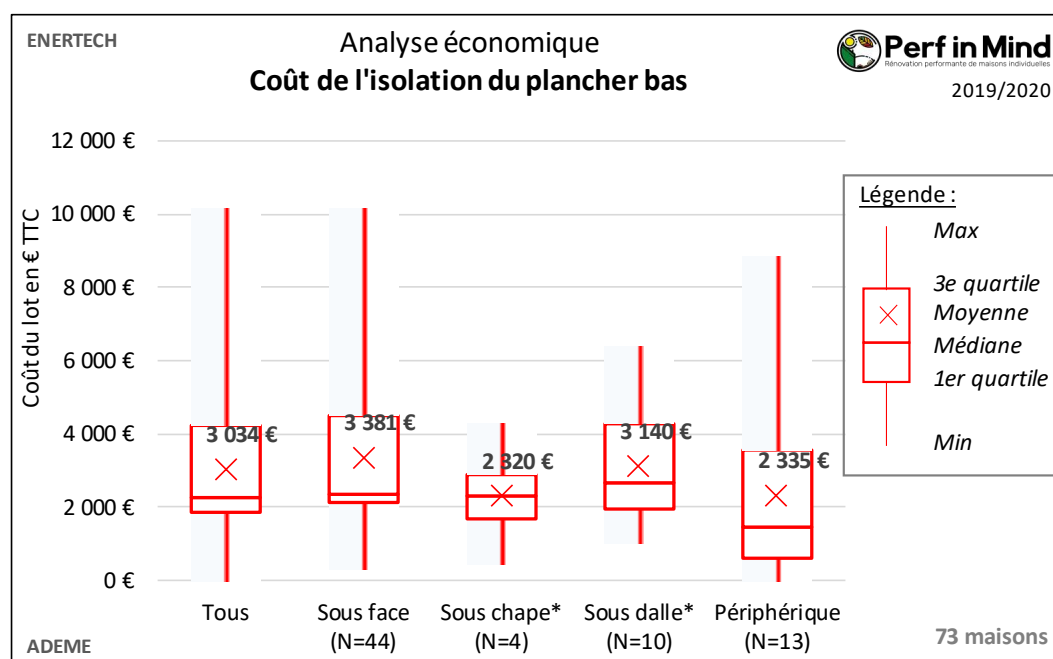


Figure 239 : Graphique des coûts d'isolation du plancher bas.

Les coûts d'isolation du plancher bas vont de 0€ (pas d'isolation du plancher bas, ou isolation périphérique au lot ITE, dont le détail n'était pas connu) à plus de 10 000 €TTC. La décomposition par mode d'isolation nous semble peu significative, au vu du manque d'information sur le détail des lots et du faible nombre de maisons concernées, notamment pour l'isolation sous chape.

De ce fait, l'analyse du coût au m² n'a pas été réalisée sur ce poste.

Bilan des travaux sur l'enveloppe et recherche de corrélation avec le Ubat :

Nous avons cherché s'il existait une corrélation entre le coût des travaux menés sur ces 4 postes de l'enveloppe et la performance atteinte par cette enveloppe, que l'on peut mesurer par exemple avec l'indicateur Ubat (voir [GLOSSAIRE](#)).

Le graphique de recherche de corrélation est présenté ci-dessous en Figure 240.

On observe une forte dispersion de l'ensemble des points, sans réelle tendance. La tendance que l'on aurait pu attendre aurait été que les Ubat faibles, identifiant les meilleures isolations, seraient liées à des coûts plus élevés, ce qui ne semble pas le cas.

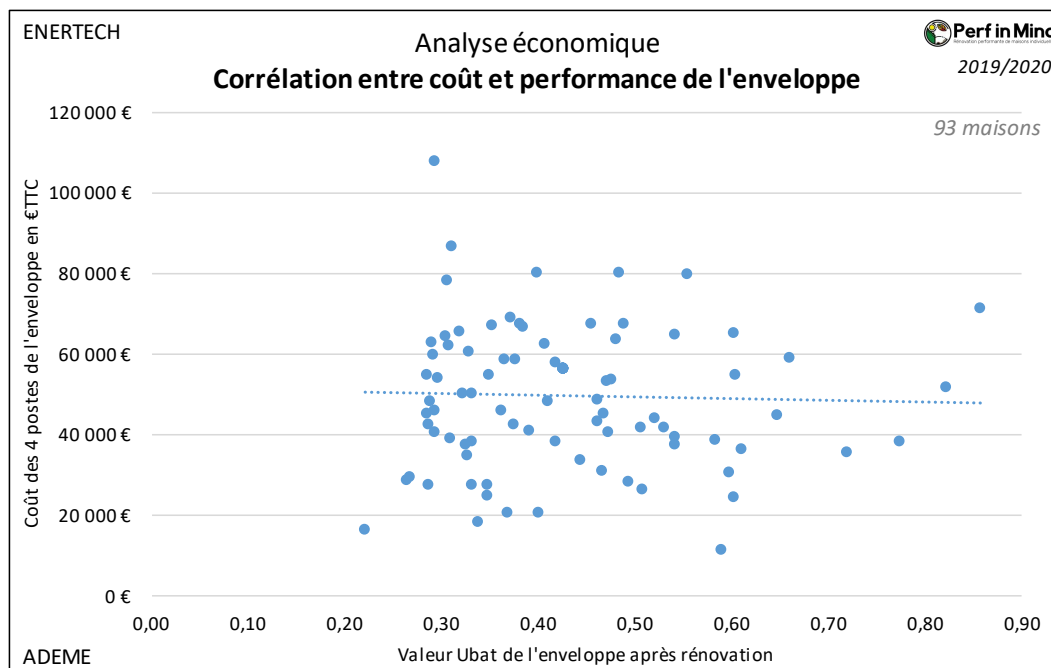


Figure 240 : Graphique de recherche de corrélation entre les coûts de rénovation des 4 postes de l'enveloppe et la performance de l'isolation, représentée par l'indicateur Ubat.

Cette absence de corrélation est liée à plusieurs paramètres : la compacité des maisons, mais aussi la forte variabilité des prix à prestation comparable. **La corrélation des prix à la performance de l'enveloppe (résistance thermique élevée, vitrage performante) s'avère totalement négligeable devant le bruit de fond de la variabilité des prix.**

10.3 Ventilation

Les coûts des travaux de ventilation, et travaux induits s'ils sont connus, sont présentés ci-dessous :

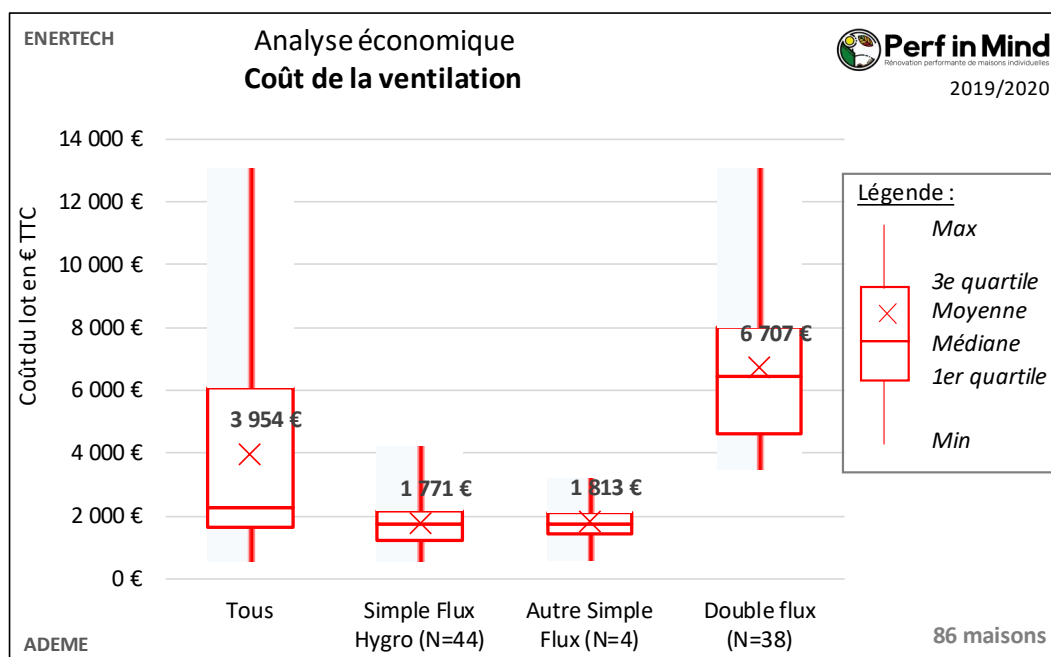


Figure 241 : Graphique des coûts de travaux de ventilation.

Si l'on fait la distinction entre type de ventilation, on observe un coût moyen d'environ 1800 €TTC en ventilation simple flux (hygroréglable ou non) et d'environ 6700 €TTC en double flux.

On note une forte dispersion sur les prix de ventilation double flux, qui s'étale de 3500 €TTC à 13 000 €TTC. Les prix en simple flux sont plus homogènes, mais ont pu atteindre 4 000 €TTC.

10.4 Systèmes de chauffage et ECS

Les coûts des travaux de chauffage et d'eau chaude sanitaire par type de systèmes sont présentés dans le graphique suivant :

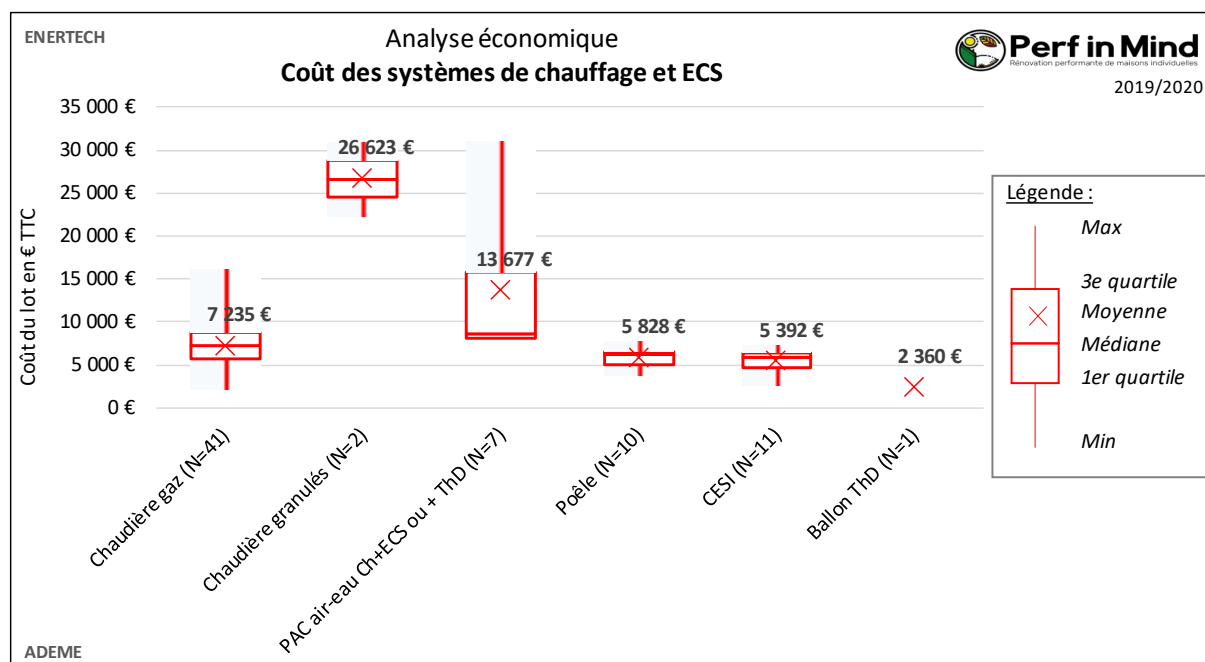


Figure 242 : Graphique des coûts de travaux de chauffage et ECS.

Les coûts moyens observés sont les suivants :

- Chaudière gaz : 7 200 €TTC ;
- Chaudière à granulés : 26 600 € TTC (sur 2 chaudières seulement) ;
- PAC air-eau double service ou PAC air-eau et ballon thermodynamique (le détail n'était pas toujours disponible) : 13 700 € TTC
- A noter que 2 pompes à chaleur géothermiques sont présentes dans l'échantillon, pour des coûts de 16 100 et 18 500 €TTC hors forages ou sondes géothermiques.
- Poêles à bois (bûches ou granulés, nous n'avons pas fait la distinction vu le faible nombre de maisons concernées) : 5 800 €TTC ;
- Chauffe-eau solaire individuel (à appoint électrique ou couplé au générateur de chauffage) : 5 400 €TTC ;
- Ballon thermodynamique pour la production ECS : 2 400 € (le détail n'était disponible que sur 1 seule opération)

10.5 Autres coûts liés à l'énergie

Comme présenté dans la [méthodologie](#) d'analyse économique, nous proposons de distinguer les 6 postes de travaux constituant une rénovation complète, communs à l'ensemble des rénovations performantes suivies, des autres travaux liés à l'énergie.

Le coût de ces autres travaux est présenté dans le graphique suivant :

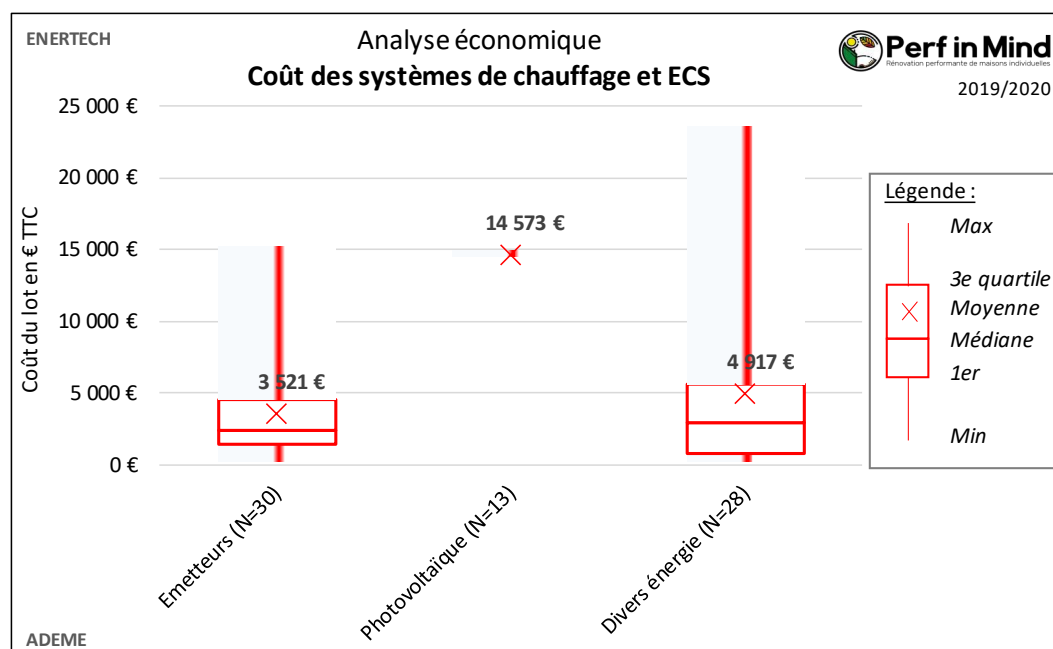


Figure 243 : Graphique des coûts des autres travaux liés à l'énergie.

Sur 30 maisons, nous avons les coûts de remplacement des émetteurs (essentiellement des radiateurs). Le coût moyen de ce poste est de 3 500 € TTC. La valeur maximale de 15 000 € TTC concerne un projet où un plancher chauffant a été réalisé ainsi que des radiateurs.

16 maisons rénovées sont équipées d'une installation photovoltaïque (voir §3.4). 12 sont dans une seule opération, visant le niveau énergie positive. Sur 1 autre maison les coûts sont également connus, mais pas sur les 3 maisons restantes. La moyenne des 13 coûts connus est de 14 600 € TTC. Le coût au Wc est de 5 €/Wc pour la maison isolée, incluant une pergola en structure bois (voir photo en Figure 117), et de 3,2 €/Wc pour les 12 maisons en bande.

Les autres coûts comprennent le remplacement à l'identique de volets extérieurs (lorsqu'ils étaient présents avant rénovation et que le détail est connu), ou des travaux non identifiés lorsque le total du plan de financement communiqué était supérieur à la somme des factures (ou devis finaux) connus. Nous avons alors affecté par défaut en « autres postes liés à l'énergie » la différence. Cette catégorie étant hétérogène et peu documentée, il est difficile d'en analyser le coût.

10.6 Coûts des Diagnostics, AMO, Maîtrise d'œuvre et Test d'infiltrométrie

Certains dispositifs d'accompagnement demandent la réalisation de diagnostics, AMO et/ou de tests d'infiltrométrie. Certains ménages ont également souhaité ces missions, ainsi également que de solliciter une maîtrise d'œuvre.

Les coûts que nous avons pu collecter sur ces études et missions sont présentés dans la ci-dessous.

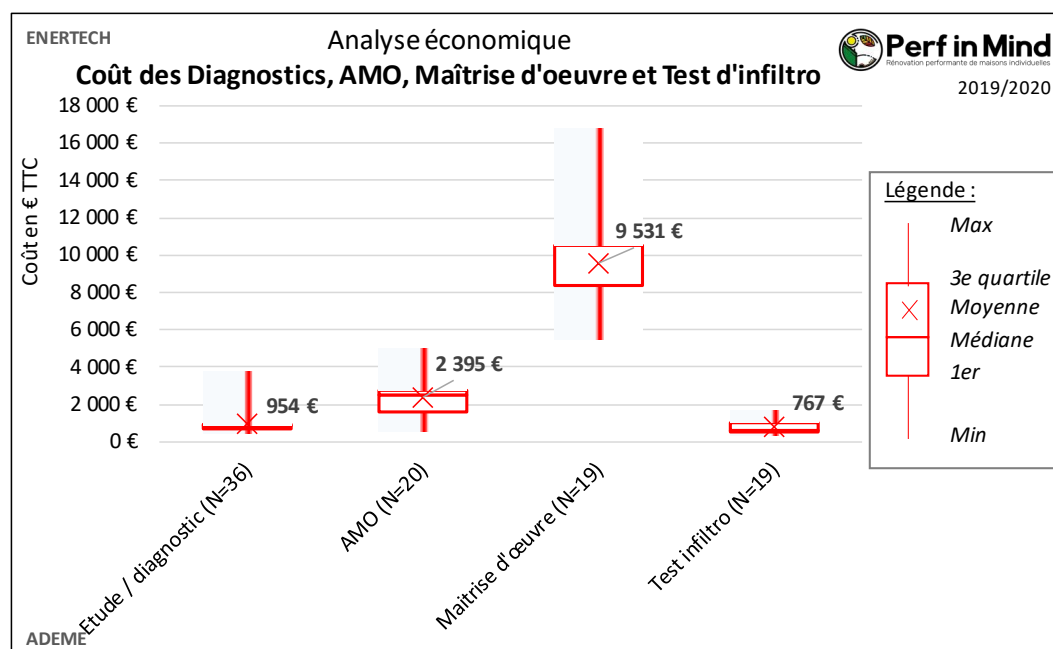


Figure 244 : Graphique des coûts unitaires des diagnostics, AMO, Maîtrise d'œuvre et Test d'infiltrométrie.

Les coûts moyens constatés sont les suivants :

- Pour les études préalables et diagnostics, environ 950 € TTC ;
- Pour les AMO, environ 2400 € TTC en moyenne (les missions d'AMO, selon les Régions, peuvent comprendre le cas échéant un accompagnement à la conception et/ou à la relecture des devis et/ou une réunion de lancement du chantier et/ou des visites de chantier. Voir [§1.3.1](#)) ;
- Pour les Maîtrises d'œuvre, environ 9 500 € TTC avec une variabilité importante, probablement selon le périmètre de la mission ;
- Pour le ou les tests d'infiltrométrie, environ 770 € TTC. Souvent entre 500 et 600 € TTC pour un seul test d'infiltrométrie, sachant que pour plusieurs maisons 2 tests ont été réalisés.

Pour une maison donnée, le total des études d'accompagnement détaillés ici sont présentés dans la Figure 245 suivante. Ces coûts sont assez différents selon le dispositif d'accompagnement, ce qui nous a amené à différencier les statistiques par dispositif.

On souligne que les coûts des études demandées par les dispositifs d'accompagnement sont généralement subventionnés en tout ou partie par ces mêmes dispositifs.

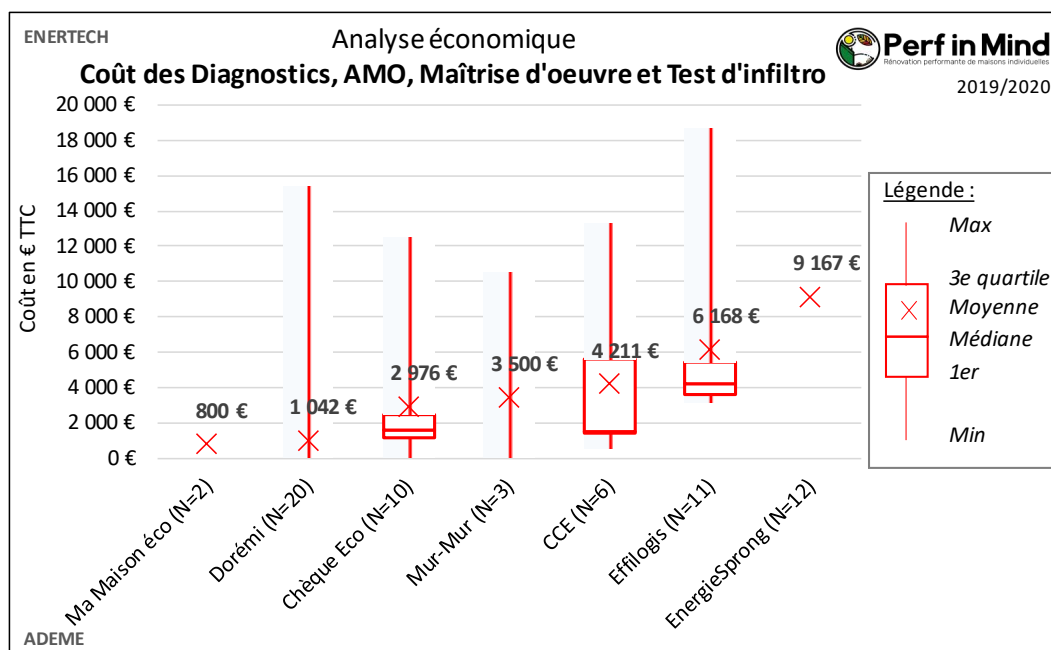


Figure 245 : Graphique des coûts totaux des études d'accompagnement.

10.7 Coût total à financer

En plus des 6 postes constituant une rénovation complète, des autres coûts liés à l'énergie, les ménages ont également eu à financer des travaux non liés à l'énergie. Ces travaux auraient sans doute été financés même sans rénovation énergétique, mais en termes de trésorerie ils ont en l'occurrence été réalisé simultanément.

Les coûts totaux à financer sont présentés dans le tableau suivant, en moyenne par mode de définition de la performance.

Coût moyen en €TTC	Energie (6 postes)				Autres énergie		Etudes, MOE, Test infiltro	Rénovation hors énergie		Total
	Coût TTC	Comp-létude	Non rénové	Auto-réha	Coût TTC	NC (PV)		Coût TTC	Auto-réha	
BBC (58)	58 100 €	89%	7%	4%	2 800 €	3%	4 700 €	17 600 €	2,3 postes	77 300 €
STR (31)	67 200 €	96%	1%	3%	5 700 €	3%	1 000 €	23 400 €	2,0 postes	96 800 €
E+ (12)	66 800 €	100%	0%	0%	14 500 €	0%	9 200 €	18 100 €	0,0 poste	108 700 €
Tous (101)	62 200 €	92%	4%	3%	5 200 €	3%	4 400 €	19 600 €	1,9 postes	87 000 €

Figure 246 : Tableau des coûts totaux de rénovation, par mode de définition de la performance.

Les postes non rénovés (fenêtres non remplacées et plancher bas non isolés) et les auto-réhabilitations portant sur les 6 postes constituant une rénovation complète sont mentionnées en pourcentage moyen du nombre de postes sur les 6 (les menuiseries partiellement rénovées sont comptées forfaitairement 0,5 poste). Par exemple, si sur une maison les menuiseries sont partiellement rénovées et l'isolation du comble réalisée par le ménage, on comptera 0,5 poste / 6 = 8% non rénové, 1 poste / 6 = 17% en auto-rénovation. Les coûts connus portent alors sur une complétude de 1 – 8% - 16% = 75%.

Pour les coûts « Autres énergie » 3 maisons présentent des installations photovoltaïques dont nous n'avons pas les coûts (ni la production d'ailleurs), ce qui est indiqué dans la colonne « NC (PV) », pour Non connu (photovoltaïque). Ces 3 maisons sur 101 constituent une occurrence de 3%.

Enfin, pour les travaux hors énergie, le nombre de poste moyen en auto-réhabilitation (hors 6 postes énergétiques mentionnés précédemment) est rappelé.

Dans la Figure 247 suivant, l'empilement des coûts est présenté maison par maison. On rappelle également le nombre de lots réalisés en auto-réhabilitation (commentaire en haut du barreau).

En moyenne sur l'ensemble des 101 maisons où les données sont disponibles, la moyenne des travaux à financer est de 87 000 €TTC au total, dont **62 200 €TTC pour les 6 postes** constituant une rénovation complète.

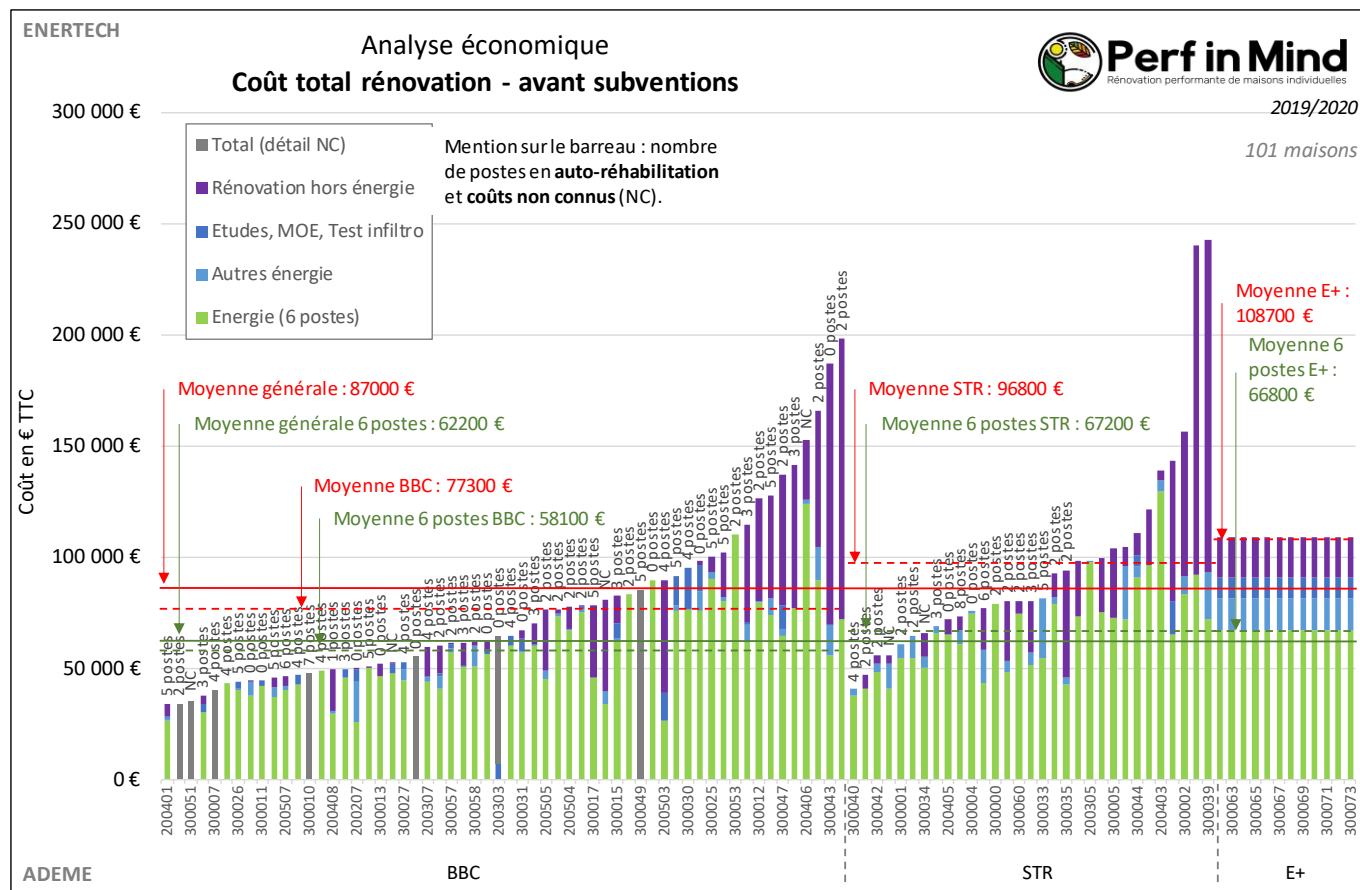


Figure 247 : Graphique des coûts totaux de rénovation.

Si l'on différencie les coûts totaux par mode de définition de la performance, on note une moyenne :

- Pour les maisons ayant défini leur performance sur le calcul BBC rénovation de 77 300 €TTC au total, dont 58 100 €TTC sur les 6 postes ;
- Pour les rénovations ayant appliqué une STR, un coût total moyen de 96 800 €TTC dont 67 200 €TTC sur les 6 postes ;
- Pour les 12 rénovations EnergieSprong, un coût de 108 700 €TTC au total, dont 66 800 €TTC sur les 6 postes.

10.8 Subventions et plan de financement

En face des coûts de rénovation, notamment énergétique, des subventions et mécanismes de financement modifiés sont disponibles pour les ménages.

Le tableau suivant présente les principaux mécanismes de subvention et de financement mobilisés, et le montant moyen *pour les ménages en ayant bénéficié* : les ménages n'en ayant pas bénéficié ne font pas baisser la moyenne. Ainsi il ne faut pas sommer ces montants moyens. La moyenne des subventions et financements mobilisés au total maison par maison est présenté dans les lignes en caractère gras :

	Montant moyen <i>pour les bénéficiaires</i>
Aide Régionale	9 411 €
Aide autres Collectivités locales ou aides ASE	7 076 €
CEE	3 253 €
CITE	4 798 €
ANAH	9 923 €
Moyenne du total des subventions connues	20 102 €
PTZ	28 365 €
Prêt BBC	20 853 €
Moyenne du total des prêts bonifiés connus	32 065 €

Figure 248 : Tableau des subventions et financements moyens pour les bénéficiaires, et moyenne du total pour les 82 maisons où ces informations sont connues.

Le solde du coût total des travaux, subvention et financement bonifié déduit, reste à financer par les ménages soit en fond propres soit par un prêt classique. Cette dernière distinction ne nous est pas connue.

Le plan de financement est présenté en Figure 249, qui répond aux coûts présentés sous la même forme en Figure 247.

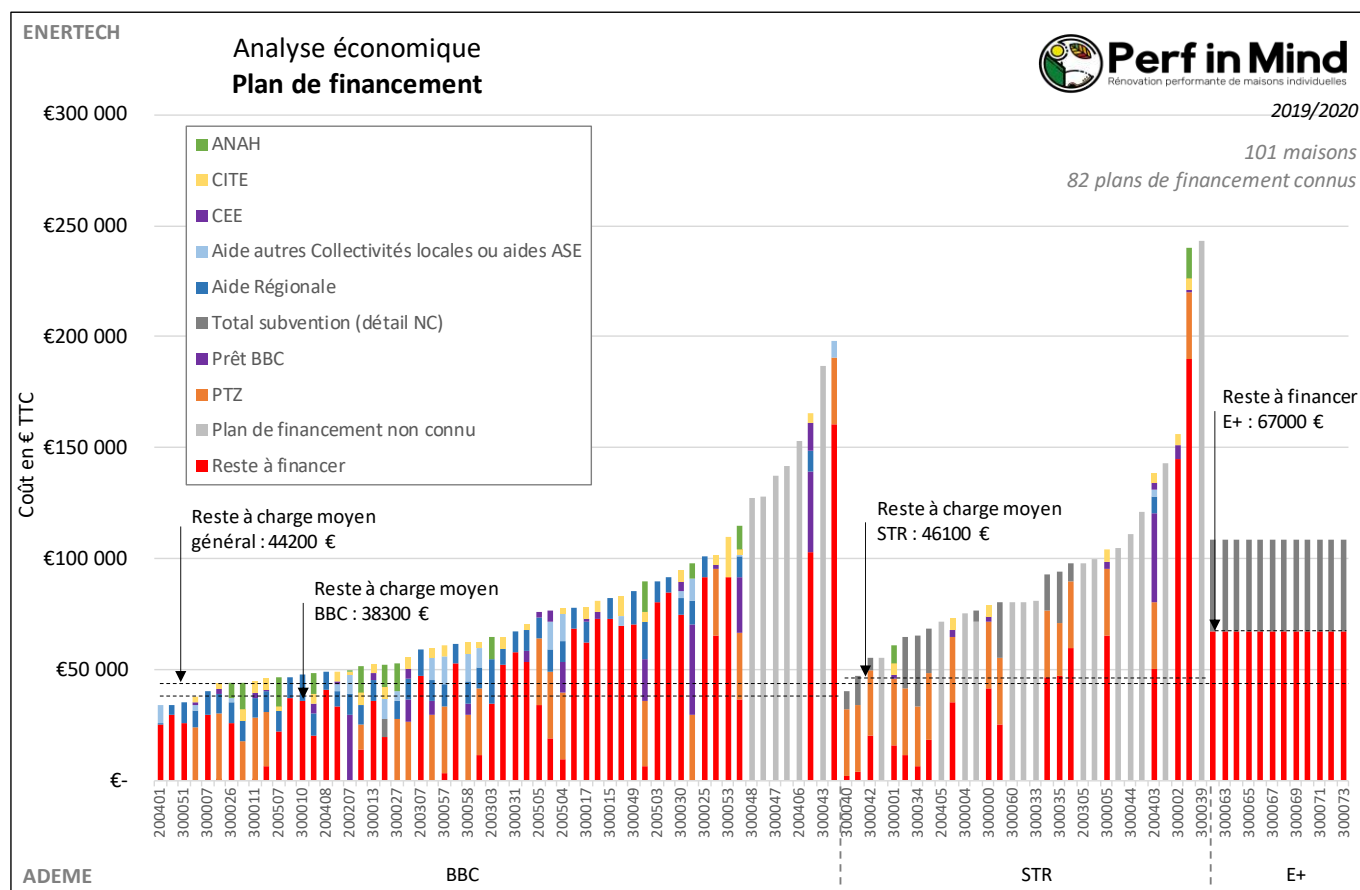


Figure 249 : Graphique du plan de financement des rénovations.

Si l'on se concentre sur le reste à charge des ménages, il est en moyenne de 44 200 € pour l'ensemble des maisons. Il descend à 38 300 € pour les rénovations dont la performance est définie par un calcul BBC, et s'élève à 46 100 € pour les rénovations basées sur les STR.

Pour les rénovations à énergie positive (E+), le montage financier est différent car le maître d'ouvrage est un bailleur social. Le reste à financer est de 67 000 € par maison, sachant qu'un prêt Eco PLS a été mobilisé pour financer une partie de ce montant (valeur non connue).

10.9 Conclusion du volet économique

Au vu des résultats précédents, nous sommes très étonnés de la variabilité des prix et sur bon nombre de prix unitaires qui atteignent des valeurs très élevées sur certaines opérations. Des ITE à plus de 200 €/m², des menuiseries à plus de 1200 €/m², des sarking à plus de 400 €/m², ou encore des ventilations double flux à plus de 12 000 € ou des installations de chaudière gaz à plus de 15 000 € nous interrogent fortement et nécessiteraient une étude spécifique plus approfondie.

Au final, le coût des travaux sur les 6 postes constituant le cœur de la rénovation énergétique complète s'élève en moyenne à 62 k€ TTC, soit 526 €/m²_{SHAB}. Elle est sensiblement supérieure à la moyenne constatée dans le rapport de l'Observatoire Effinergie sur les maisons rénovées BBC d'avril 2021, où le coût moyen est de 55 900 € HT par maison, soit 59 000 € TTC (avec une TVA de 5,5%). Elle est également supérieure au total des subventions et prêts bonifiés disponibles en moyenne (respectivement 20 k€ et

32 k€), ce qui ne permet pas systématiquement d'atteindre un reste à charge nul ou quasi-nul pour les ménages les plus modestes.

Les coûts des travaux de rénovation sont sujets à des **variations multifactorielles**, où la performance a un faible impact. Des variations régionales voire locales importantes sont constatées par l'ensemble des acteurs. Il semble toutefois qu'il existe une perspective d'évolution à la baisse des coûts de certaines techniques. L'accompagnement des artisans à la construction des prix par l'analyse comptable de leur fonctionnement serait également une piste à explorer.

Par ailleurs, certains coûts peuvent s'expliquer le temps investi à se former à de nouvelles techniques, couplé à une incertitude des artisans sur leur carnet de commande de rénovation performante. A ce titre, la structuration par les politiques nationales d'un **marché stable et dynamique de la rénovation performante** permettrait de créer les conditions de la confiance, et contribuerait à rationaliser les prix.

Ainsi la massification de la rénovation performante pourra permettre demain une meilleure rentabilité économique de la rénovation énergétique, et de **généraliser l'équilibre en trésorerie** (équivalence entre les factures énergétiques avant travaux et les mensualités de prêts + factures après travaux), qui est déjà effectif sur certaines rénovations performantes.

Quoi qu'il en soit, il est extrêmement positif que les **importants dispositifs d'aide et de prêt bonifiés**, présents à l'échelle nationale et régionale, ont permis, avec l'accompagnement des ménages par les différents dispositifs, **le bouclage du plan de financement de ces 106 rénovations pionnières**.

NB : l'analyse en coût global avant/après rénovation ou le calcul du temps de retour du surinvestissement énergétique n'a pas été possible car les factures énergétiques avant travaux n'ont pas pu être collectées dans le cadre du projet.

Conclusion

Cette étude nous livre un premier panorama mesuré sur un échantillon de 106 maisons individuelles rénovées à un niveau BBC ou équivalent.

Les résultats sont très positifs sur l'ensemble des paramètres étudiés : les ménages ont pu bénéficier de dispositifs d'accompagnement bien structurés, ils sont très majoritairement satisfaits des rénovations effectuées, les performances énergétiques visées sont atteintes dans la très grande majorité des cas (>80%), le confort après rénovation est jugé bon été comme hiver, la qualité d'air mesurée est très bonne dans la majorité des cas, et un plan de financement a pu être proposé aux ménages, qui leur a permis de réaliser ces rénovations pionnières en maison individuelle.

Ce rapport est également très riche en enseignements techniques et organisationnels. Ces observations de terrain vont pouvoir alimenter les échanges techniques lors de la conception, en éclairant par exemple les différentes pratiques d'isolation, le choix multicritère entre ventilation simple et double-flux, ou encore le choix des systèmes pour la production ECS. De nombreuses bonnes pratiques ont été mises en évidence et sont à généraliser, comme l'isolation périphérique des planchers bas, la régulation terminale performante du chauffage, les équipements hydro-économiques pour l'ECS. Certaines lacunes sont également identifiées, comme les nombreux défauts de réglage de la ventilation quel que soit son type, l'absence de réglage de l'installation de chauffage dans certains cas. De façon générale, les ménages interrogés sont nombreux à s'être sentis seuls au moment du chantier. Il nous semble qu'un meilleur accompagnement de cette phase, et en particulier de la phase critique de mise au point et d'appropriation des systèmes techniques permettrait à la fois de maximiser les économies d'énergie réelles et de favoriser une meilleure appropriation de ces systèmes par les ménages.

L'ensemble de ces résultats est mis à la disposition de tous les acteurs impliqués dans le bâtiment, des dispositifs d'accompagnement et des services de l'état aux artisans et aux ménages eux-mêmes en passant par les maîtres d'œuvre, bureaux d'études et financeurs.

Annexe 1 : paramètres variables du calcul du besoin de chauffage

Cette annexe complète la méthodologie du calcul Besoin simple avec la prise en compte d'incertitudes sur le bâtiment et les usages, décrite au §4.3.

Le tableau suivant liste les données faisant l'objet d'incertitudes, et détaille les hypothèses et variabilité d'hypothèses faites selon le mode de calcul choisi :

	Mode de calcul et nombre de maisons où ces données sont connues				
	Sans mesure ni n50, météo RT	Sans mesure ni n50, météo réelle	Mesure "base", sans n50, météo réelle	Mesure "base", n50 connu, météo réelle	Mesure "avancée", n50 connu, météo réelle
	103 maisons	103 maisons	78 maisons	57 maisons	25 maisons
Météo utilisée	Météo standard de la station de référence de la zone climatique, corridée de l'altitude	Météo de la station la plus proche, pour l'année de mesure, corrigée de l'altitude. Voir §1.2.3.			
Données techniques					
Métrés non connus (concerne 8 maisons)	Métrés estimé avec hypothèse variable de facteur de forme [2,5 ; 3,5 ; 5] et/ou majoration variable [0,8 ; 1 ; 1,2] Hypothèse variable de majoration liée à la pente du toit [1,15 ; 1,20 ; 1,41]				
Ponts thermiques	Répercution de l'incertitude des métrés, liaison plancher bas - terrasse et balcon variable [0m ; 2m ; 5m], nombre d'angle rentrants variable [0 ; 1 ; 2], majoration variable de certains métrés [0,8 ; 1 ; 1,2]				
U parois non isolées (concerne 34 maisons)	Hypothèse variable de U : pour mur non isolé [1,3 ; 1,5 ; 1,9 W/m².K], pour plancher bas non isolé [0,85 ; 2,33 ; 3,2 W/m².K], pour toit non isolé [1,2 ; 1,7 ; 2,4 W/m².K]				
Coefficient b du plancher bas	Paroi isolée sur Local non chauffé : b=0,9 Hypothèse variable (selon conductivité du sol, sec ou humide) : plancher non isolé sur vide sanitaire [0,27 ; 0,31 ; 0,54], sur terre-plein [0,06 ; 0,16 ; 0,52] ; plancher avec isolation périphérique sur vide sanitaire [0,76 ; 0,79 ; 0,83], sur terre-plein [0,31 ; 0,52 ; 0,72] ; sur local non chauffé isolé en périphérie [0,27 ; 0,31 ; 0,54]				
Uw de menuiseries non connu (concerne 3 maisons)	Hypothèse variable Uw [1,3 ; 1,4 ; 1,7]				
Orientation des baies si non connue (concerne 22 maisons)	Hypothèse variable : façade principale [25% ; 40% ; 70%] ; autre façade [10% ; 20% ; 25%]				
Masques solaires (connus pour les 38 suivis "avancés")	Hypothèse variable de traduction du niveau 3 de masque relevé : occultation de [50% ; 70% ; 90%]. Le niveau 1 correspond à un masque nul (0%), et le niveau 2 à la moitié du niveau 3.				

	Mode de calcul et nombre de maisons où ces données sont connues				
	Sans mesure ni n50, météo RT	Sans mesure ni n50, météo réelle	Mesure "base", sans n50, météo réelle	Mesure "base", n50 connu, météo réelle	Mesure "avancée", n50 connu, météo réelle
Etanchéité à l'air	Hypothèse variable de n50 [1 ; 3,1 ; 4,5 vol/h]			n50 connu ou déduit du Q4	
Ventilation	Hypothèse variable de renouvellement d'air : VMC SF autoréglable ou DF : [0,4 ; 0,5 ; 0,6] VMC SF hygroréglable : [0,2 ; 0,3 ; 0,4 vol/h] Efficacité de l'échangeur double flux : [76% ; 82% ; 86%]				Débit d'air mesuré Efficacité d'échangeur mesurée (suivi "avancé")
Usage					
Température de consigne	Hypothèse variable [19,3°C ; 20,1°C ; 20,7°C]		Température mesurée		
Apports internes	Hypothèse variable de consommation annuelle d'électricité spécifique et cuisson par occupant [550 ; 1100 ; 2200 kW.h/an.occupant]		Consommation d'électricité spécifique et cuisson mesurée (compteur électrique moins chauffage et ECS électrique)		
Apports des occupants	Nombre d'occupant connu (questionnaire) : 46,35W par adulte et 31,05W par enfant.				
Ouverture des fenêtres	Non connue, non mesurée. Nous n'avons pas fait d'hypothèse d'ouverture. [100% fermées en hiver]				

Figure 250: Tableau des données faisant l'objet d'incertitudes, et des hypothèses variables utilisées.

Annexe 2 : détails de la méthodologie d'analyse du chauffage et ECS

En complément de la description générale faite en début de partie [CONSOMMATIONS](#), les tableaux ci-dessous détaillent la méthodologie selon les cas rencontrés. Les renvois entre parenthèses sont explicités [en fin de la présente annexe](#).

❖ Logements en suivi BASE - GAZ

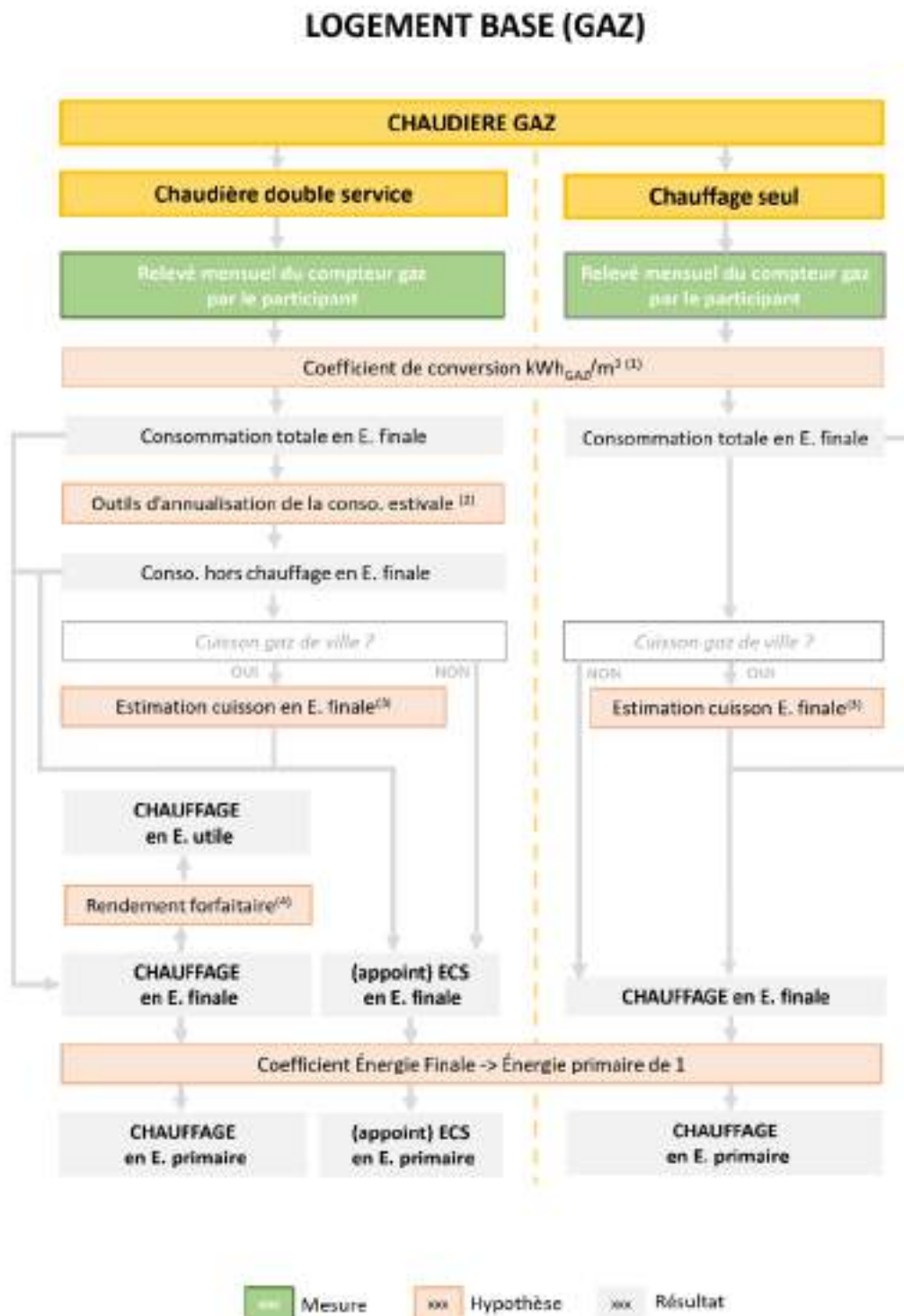


Figure 251 : Post-traitement de la mesure - logement base en chauffage gaz.

❖ Logement en suivi AVANCE - GAZ

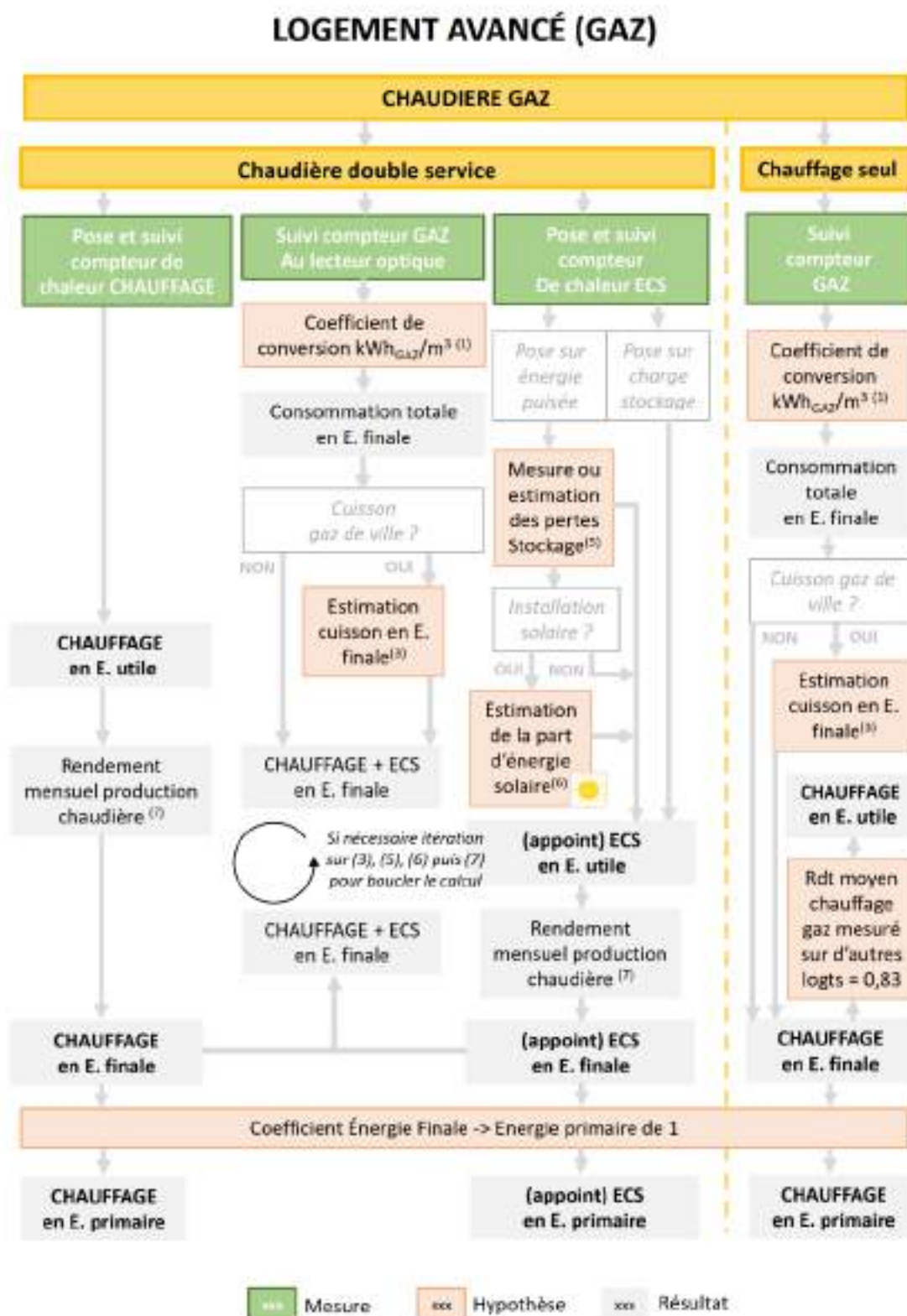


Figure 252 : Post-traitement de la mesure - logement avancé en chauffage gaz.

❖ Logement en suivi BASE - BOIS

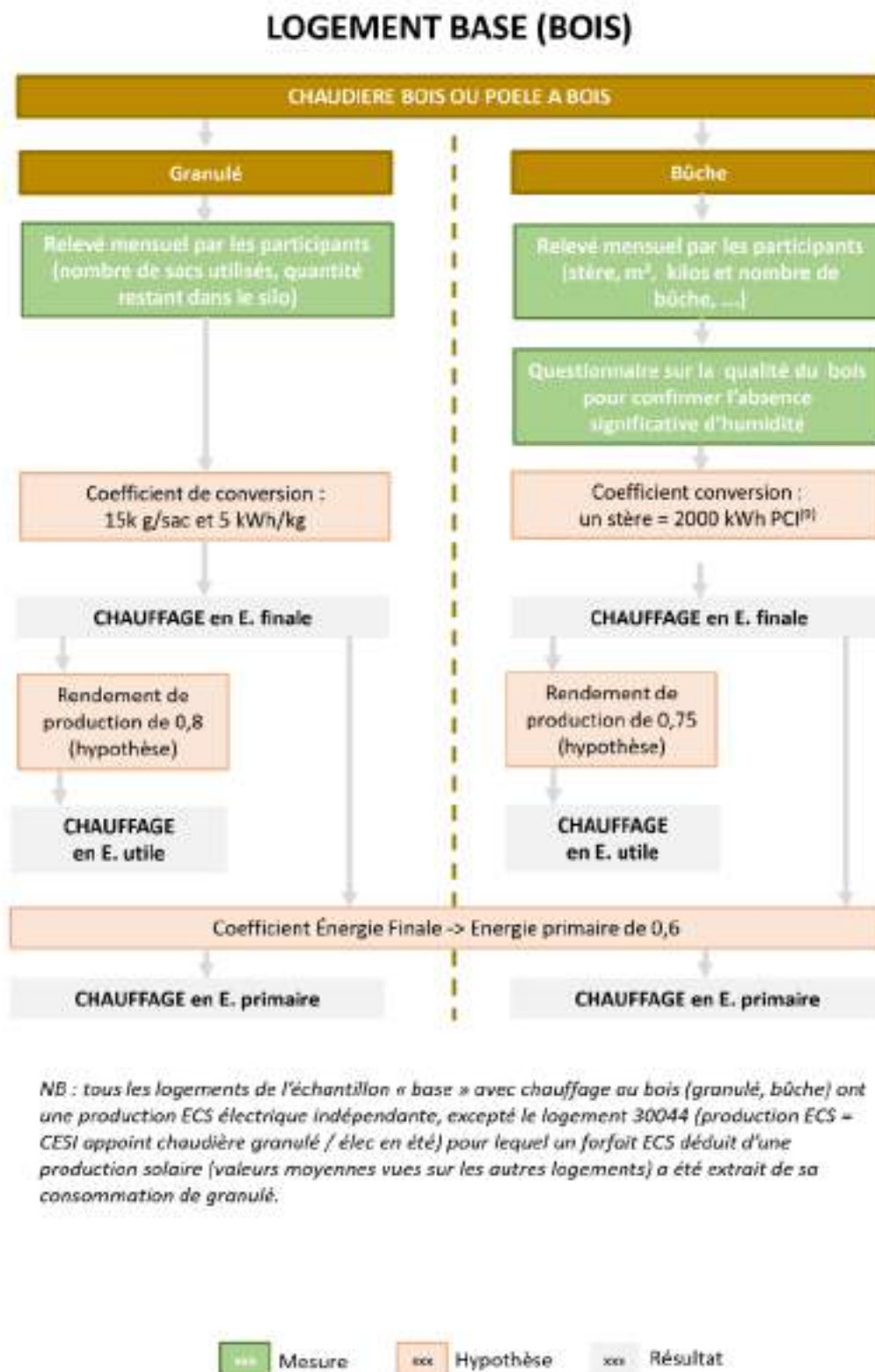


Figure 253 : Post-traitement de la mesure - logement base avec chauffage au bois.

❖ Logement en suivi AVANCE - BOIS

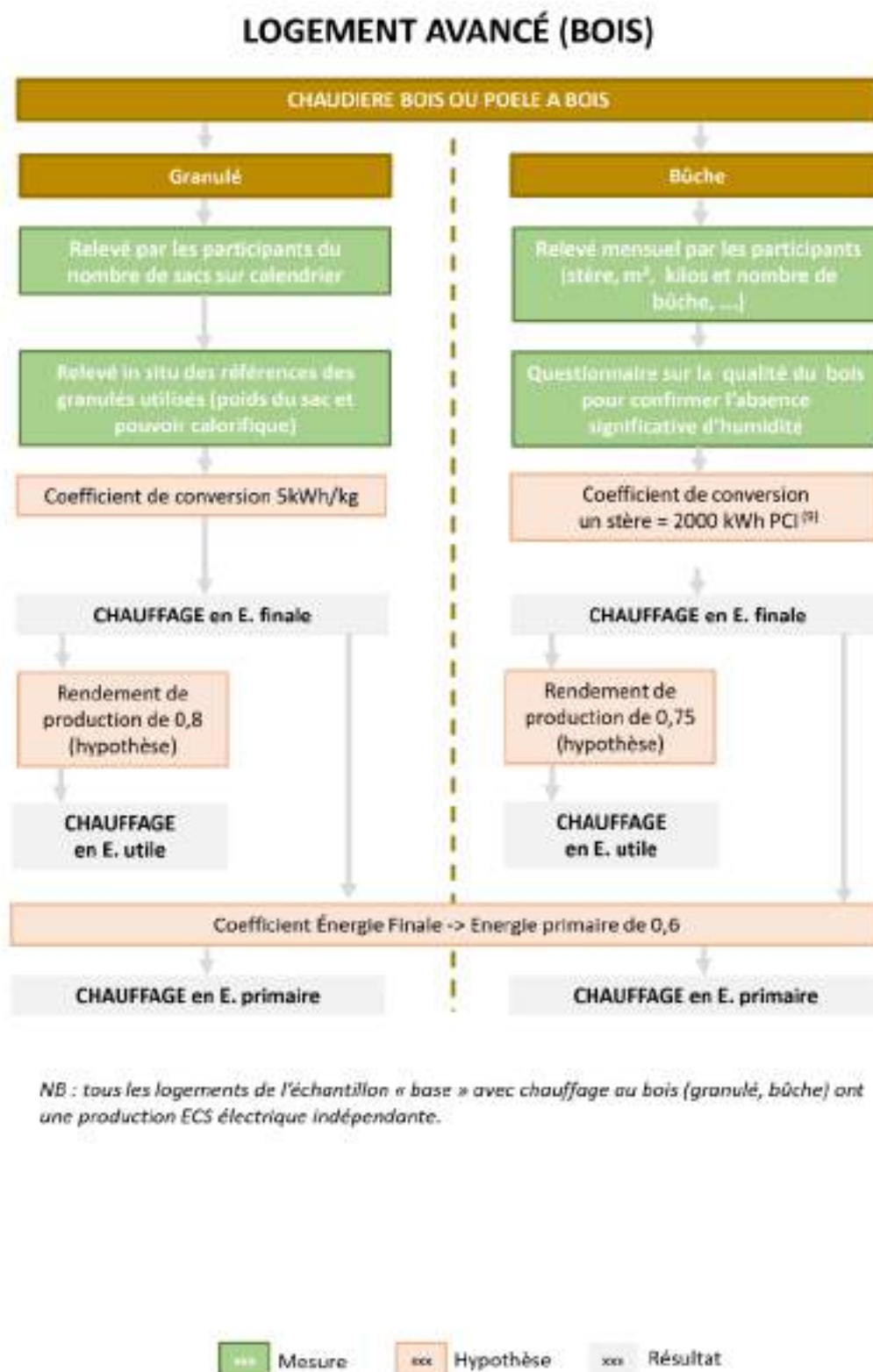


Figure 254 : Post-traitement de la mesure - logement avancé avec chauffage au bois.

❖ Logement en suivi BASE - PAC

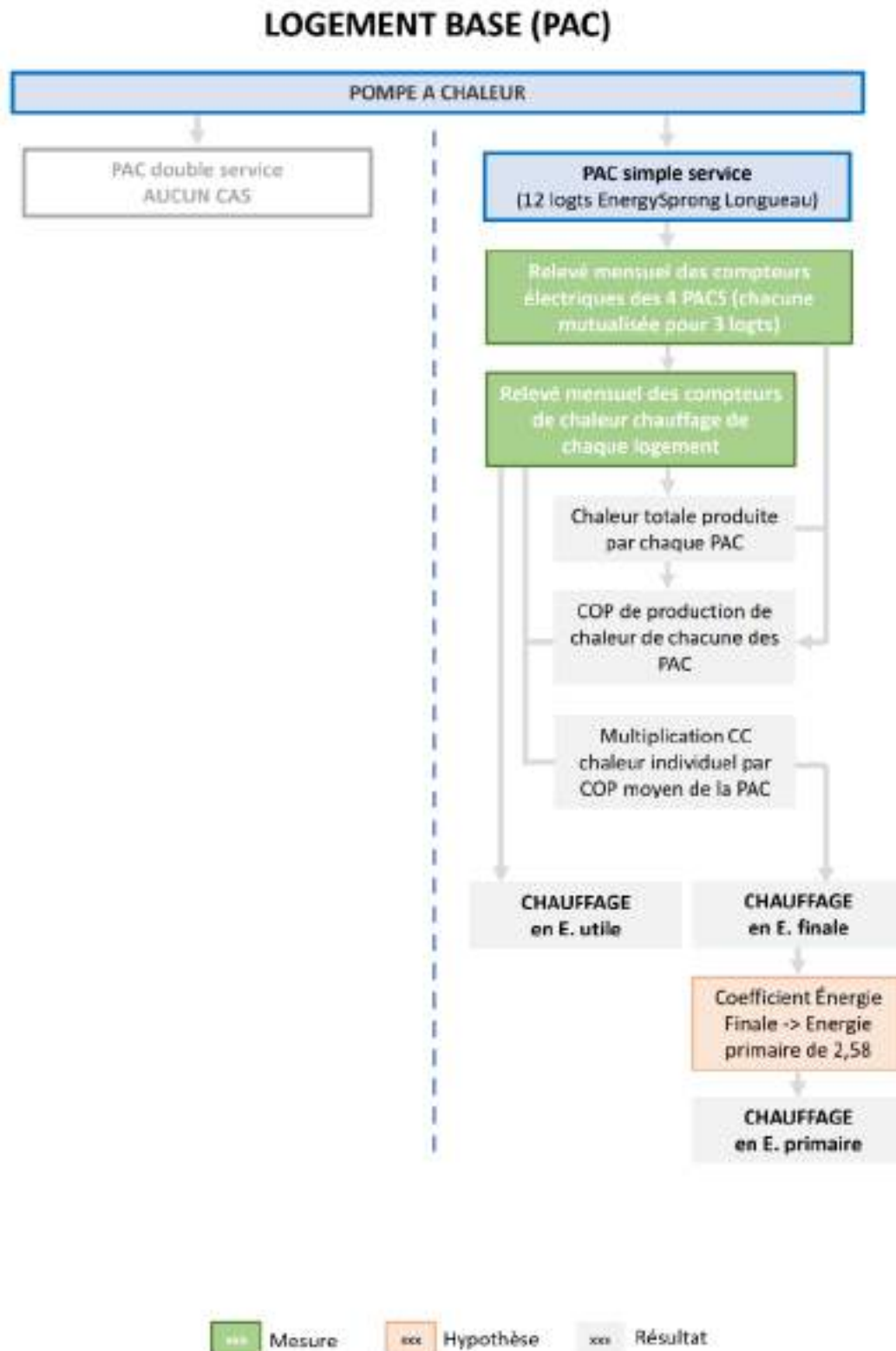


Figure 255 : Post-traitement de la mesure - logement base avec chauffage par pompe à chaleur.

❖ Logement en suivi AVANCE - PAC

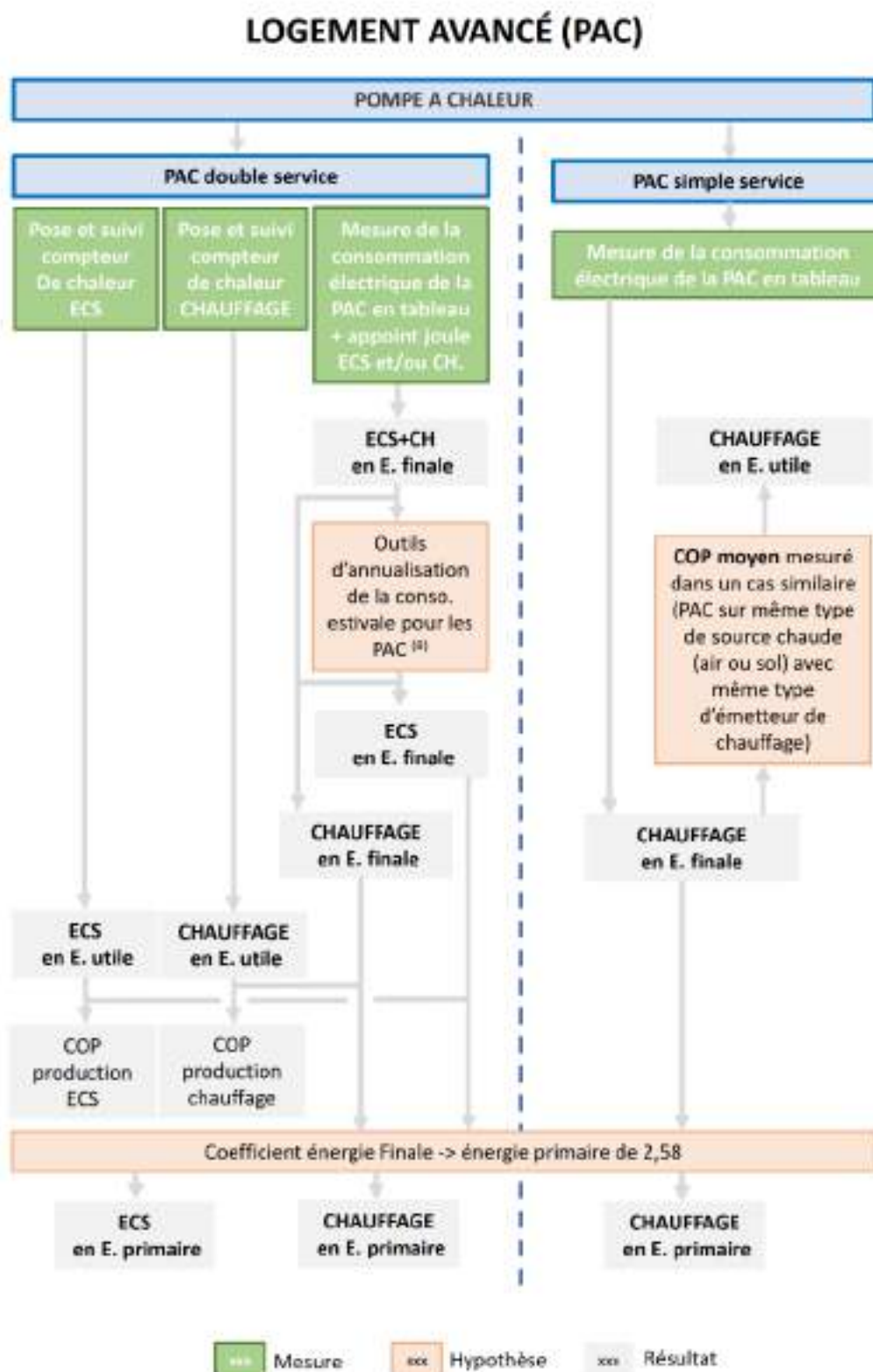


Figure 256 : Post-traitement de la mesure - logement avancé avec chauffage par pompe à chaleur.

❖ Liste des renvois des diagrammes

- ¹ Coefficient de conversion gaz moyen de la commune : <https://www.grdf.fr/particuliers/coefficient-conversion-commune>
- ² Outil élaboré en interne, consistant à extrapoler les consommations des mois manquants (ECS gaz + cuisson gaz) grâce une
fonction mathématique saisonnière calibrée sur les consommations mesurées en été.
- ³ Rapport ADEME « Mesure des consommations d'énergie pour l'usage cuisson domestique ».
- ⁴ $Rdt=0,84$ égal à la moyenne des rendements de génération de chauffage mesurés sur les chaudières gaz des logts avancés
- ⁵ Extrapolé annuellement à partir de la mesure gaz (consommation gaz en été sans puisage ECS ni cuisson gaz) ou à défaut estimé à partir du volume stockage ECS, sur une loi pertes= $f(Vol .stock.)$ établie à partir de quelques cas où la mesure des pertes estivales a pu être établie.
- ⁶ Dans le cas où le compteur de chaleur ECS est positionné sur le puisage ECS et où l'installation comporte une production solaire thermique, une estimation de production solaire mensuelle est réalisée, prenant en compte la surface, l'orientation des capteurs et les coordonnées géographiques du lieu.
- ⁷ Etablissement des rendements de production mensuels afin de dissocier le rendement de production chauffage du rendement de production ECS :
 - Cas 1 : Aucun problème de mesure et compteur de chaleur ECS sur la charge ECS (en sortie de chaudière). Dans ce cas aucune itération n'est nécessaire sur le rendement malgré l'hypothèse effectuée le cas échéant sur la cuisson gaz.
 - Cas 2 : Une voie de mesure est manquante (gaz, compteur de chaleur) OU le compteur de chaleur ECS se trouve sur le puisage ECS ce qui nécessite une estimation des pertes de stockage ECS (pertes mentionnées sur l'étiquette du ballon ou perte estimée à partir du volume de ce dernier) ainsi que de la production solaire⁽⁶⁾ si elle existe, pour remonter à l'énergie utile fournie par l'appoint gaz. Dans ce cas le rendement mensuel de production gaz est pris comme une hypothèse de départ (moyenne des cas où la mesure directe du rendement de production a été possible) et une itération est réalisée sur les hypothèses (cuisson, perte ballon, production solaire, jusqu'à $\pm 25\%$) de manière à ce que le calcul converge sur la consommation de gaz.
 - Cas 3 : lorsque le cas 2 ne converge pas (plusieurs centaines de kW.h d'écart) malgré les itérations, alors une consommation d'entretien est ajoutée à la chaudière (moitié chauffage/ECS en période de chauffe et 100% sur l'ECS hors période de chauffe) de manière à boucler la consommation de gaz.
- ⁸ En l'absence de problème de mesure : calcul du COP mensuel de production ECS hors saison de chauffe (généralement juin à septembre) avec mesure électrique et compteur de chaleur ECS. Puis annualisation du COP par une fonction saisonnière épousant le COP mesuré en été.
En cas de problème sur le compteur de chaleur ECS : annualisation de la mesure électrique estivale sur le même procédé pour déduire la consommation de chauffage. On remonte aux énergies utiles soit grâce au compteur de chaleur, soit par un COP moyen mesuré sur une configuration similaire.
- ⁹ Source : ADEME, Enquête sur les prix des combustibles bois en 2019-2020

Annexe 3 : bibliographie

Autres livrables du projet, disponibles sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind> :

- « *Panorama des dispositifs existants de rénovation performante de maisons individuelles* » réalisé par Effinergie dans le cadre de Perf in Mind, février 2020,
- « *Etat de l'art des études portant sur les pratiques et modes d'habiter consécutives à des travaux de rénovation* » réalisé par l'Institut négaWatt dans le cadre de Perf in Mind, janvier 2020,
- « *Etude Sciences Sociales : L'expérience d'« usager-occupant » - Analyse des entretiens et observations sur 10 maisons/usagers* » réalisé par l'Institut négaWatt dans le cadre de Perf in Mind, janvier 2020.

Autres études citées dans le rapport :

- « *Rénovation performante par étapes - Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance Bbc rénovation ou équivalent à terme en logement individuel* » : Etude réalisée pour l'ADEME par Dorémi et Enertech. Rapport disponible sur <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/4168-renovation-performante-par-etapes.html>,
- Observatoire BBC Effinergie : « *Etude sur la rénovation basse consommation des maisons individuelles* », réalisée par Effinergie, Avril 2021. Disponible sur <https://www.observatoirebbc.org/publications/renovation>,
- Rapport « *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien - Synthèse bibliographique pour la rénovation performante à destination des concepteurs et des artisans* » Etude réalisée par Enertech pour Oktave et le programme Climaxion de la Région Grand Est et de l'ADEME, 2017. Disponible sur https://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/45/171221_Etude%20humidite%20b%C3%A2ti%20ancien_vfinale.pdf,
- PANEL Elecdom : Campagne de mesure des consommations d'électricité spécifique dans les logements. Projet réalisé par Enertech avec le soutien de l'ADEME et RTE, mars 2021. Rapport complet et synthèse disponible sur <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4473-panel-usages-electrodomestiques.html>,
- ECSpect : Campagne de mesure sur les consommations d'eau chaude sanitaire et les solutions pour les réduire. Projet réalisé par Enertech avec le soutien de l'ADEME, rapport disponible prochainement (fin 2021).

Plus d'informations sur des dispositifs cités :

- Sur le label BBC Effinergie : <https://www.effinergie.org/web/les-labels-effinergie/effinergie-renovation/1654>,
- Sur la démarche EnergieSprong : <http://www.energiesprong.fr/>,
- Sur le dispositif Dorémi : <https://www.renovation-doremi.com/>,
- Sur les STR : <https://www.enertech.fr/rubrique/rubrique-44-2/>.