



Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie

Enseignements opérationnels tirés de 119 constructions
et rénovations du programme PREBAT

2012 - 2016



Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie

*Enseignements opérationnels tirés de 119 constructions
et rénovations du programme PREBAT
2012 - 2016*

Août 2017

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Dans le cadre de la capitalisation, de l'exploitation et de la valorisation des campagnes de suivi-évaluation des bâtiments démonstrateurs PREBAT,

- la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN) du ministère de la Transition écologique et durable et du ministère de la Cohésion des territoires
- et l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe)

ont confié la réalisation de ce document à la direction technique Territoires et ville du Cerema (centre d'études sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).

Celui-ci a pour objet de présenter les enseignements tirés de 119 évaluations d'opérations instrumentées du programme PREBAT, mesurant leur performance énergétique et leur confort thermique.

Remerciements

Cet ouvrage a été rédigé collectivement par le Cerema sous la direction de Pascal Cheippe (Cerema Territoires et ville) et dans le cadre d'un groupe de travail comprenant Fabien Auriat (DGALN), Pierre-Édouard Vouillamoz (Ademe), Pierrick Nussbaumer (Cerema Est), Jean-Alain Bouchet (Cerema Méditerranée), Myriam Humbert (Cerema Ouest) et Bernard Fiole (Cerema Territoires et ville).

Ont participé à l'élaboration du présent rapport :

en tant que contributeurs :

- au Cerema : Olivier Bonneau (Centre-Est), Jean-Alain Bouchet (Méditerranée), Noélie Carretero (Normandie-Centre), Pascal Cheippe (Territoires et ville), Jordan Gauvrit (Ouest), Eddy Handtschoewercker (Sud-Ouest), Myriam Humbert (Ouest), Laurent Laloge (Territoires et ville), Constance Lancelle (Ouest), François Marconot (Ile-de-France), Bassam Moujalled (Centre-Est), Pierrick Nussbaumer (Est), Agnès Pouillaude (Ouest), Julie Ringaut (Nord-Picardie) et Anne-Laure Tayeb (Nord-Picardie);
- à l'Université de Tours : Christèle Assegond et Jean-Philippe Fouquet (sociologues).

en tant que relecteurs :

- Fabien Auriat et Romain Gaeta (DGALN);
- Pierre-Edouard Vouillamoz (Ademe);
- Jean-Robert Millet et Rofaïda Lahrech (CSTB);
- Muriel Dupret (Enertech);
- Cédric Baumont (Costic);
- Amandine Bibet-Chevalier, Noémie Simand, Marine Ninet et Anne Vial (Cerema Territoires et ville).



SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	7
1. Une expérimentation de bâtiments démonstrateurs.....	7
2. Une capitalisation d'enseignements opérationnels	8
3. Une capitalisation progressive.....	9
4. Un échantillon diversifié d'opérations à basse consommation.....	10
5. Des définitions et conventions de présentation des résultats	14
Méthode d'évaluation des performances énergétiques et du confort	19
1. Une méthode tournée vers la caractérisation <i>in situ</i> et l'explication des écarts de consommation	19
2. Différents objectifs d'évaluation basés sur les mesures.....	20
3. Une méthode de suivi associant mesure, observation et enquête.....	20
4. Une méthode spécifique d'analyse des écarts entre consommation mesurée et consommation de l'étude thermique	21
1 Consommations, productions et performances d'ensemble	25
1.1 Consommation totale mesurée.....	26
1.2 Répartition des postes de consommation.....	28
1.3 Évolution des consommations dans les premières années de suivi.....	41
1.4 Production d'électricité photovoltaïque.....	44
1.5 Performances attendues et mesurées.....	46
1.6 Explication des écarts constatés	48
2 Conditions météorologiques.....	53
2.1 Niveaux de température extérieure hivernale.....	54
2.2 Température extérieure de non-chauffage.....	55
2.3 Impact sur la consommation de chauffage	57

3	Conditions d'occupation	61
3.1	Température de chauffage	62
3.2	Réduits de température de chauffage	70
3.3	Apports internes	83
3.4	Combinaison des conditions météorologies et d'occupation	90
3.5	Besoin en eau chaude sanitaire	92
4	Performances énergétiques du bâti	95
4.1	Caractéristiques des enveloppes de l'échantillon	96
4.2	Isolation thermique de l'enveloppe	107
4.3	Perméabilité à l'air de l'enveloppe	118
5	Performances énergétiques des systèmes techniques	125
5.1	Chauffage	126
5.2	Eau chaude sanitaire	138
5.3	Ventilation	150
5.4	Auxiliaires	159
5.5	Refroidissement	165
5.6	Éclairage	167
5.7	Autres équipements immobiliers	180
5.8	Équipements mobiliers	189
5.9	Installations photovoltaïques	208
6	Pratiques des acteurs au regard de la performance énergétique	213
6.1	Précisions sur les résultats obtenus	214
6.2	Acteurs de la construction-rénovation	215
6.3	Des acteurs de la construction à ceux de l'utilisation	218
7	Confort thermique et qualité d'usage	221
7.1	Satisfaction des occupants et confort perçu	222
7.2	Confort thermique : différents enjeux selon les saisons	223
7.3	Confort thermique d'hiver	224
7.4	Confort thermique d'été	225
7.5	Confort thermique de mi-saison : certains bâtiments présentent des niveaux de température élevés ..	234
7.6	Inconfort thermique et difficultés de compréhension	235
7.7	Autres aspects de la qualité d'usage	236

8 Coûts	239
8.1 Échantillon de la capitalisation économique 2016.....	240
8.2 Analyse en coût global.....	241
8.3 Le coût d'investissement	246
8.4 Le coût global	255
CONCLUSION	265
ANNEXES - DÉTAIL DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION MISE EN ŒUVRE PAR LE CEREMA.	269
A.1 Conditions météorologiques de l'année de suivi	269
A.2 Conditions d'occupation de l'année de suivi.....	269
A.3 Caractérisation de la performance de l'enveloppe	273
A.4 Caractérisation de la performance des systèmes	276
A.5 Analyse des pratiques et de la qualité d'usage	281
A.6 Analyse du confort thermique mesuré.....	282
A.7 Analyse économique	284
TABLE DES MATIÈRES	289
GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS	295
CONVENTIONS DE PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	297





INTRODUCTION

Parmi les 3 000 bâtiments à basse consommation lauréats du programme « Bâtiments démonstrateurs », plus de 200 ont été instrumentés pour la mesure de leur performance énergétique et de leur confort thermique. Actuellement, 119 d'entre eux ont été évalués et permettent de tirer des enseignements sur les consommations réelles, les facteurs qui les influencent, les solutions performantes, mais aussi les pratiques, le confort thermique et la qualité d'usage induite, ainsi que les coûts.

1. Une expérimentation de bâtiments démonstrateurs

Les mesures mises en place par l'État pour réduire les consommations et les émissions de gaz à effet de serre sont accompagnées d'un programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment (PREBAT) pour apporter aux professionnels et aux particuliers des solutions performantes. Le premier objectif, au regard de son importance relative, s'adresse aux bâtiments existants. La construction neuve est également visée, que ce soit pour faciliter la mise en œuvre de la réglementation thermique 2012 qui généralise les bâtiments à basse consommation d'énergie, ou pour préfigurer les bâtiments à énergie positive de demain.

Dans le champ de l'expérimentation, depuis 2006, conjointement avec les directions régionales de l'Ademe, toutes les régions métropolitaines ainsi que la Réunion ont soutenu la réalisation de près de 3 000 **bâtiments à basse consommation** dans le cadre du programme « Bâtiments démonstrateurs », au sens de modèles reproductibles, disséminés sur le territoire, et qui présentent des ensembles de solutions architecturales, techniques et financières très performants.

Parmi ces bâtiments, plus de 200 ont été instrumentés pour la mesure de leur performance énergétique durant deux ans. Par ailleurs, les suivis-évaluations comportaient un volet d'observations et d'enquêtes auprès des habitants et plus largement des usagers, afin de mieux connaître l'utilisation du bâtiment une fois la construction ou la rénovation achevées. Les suivis-évaluations sont répartis entre le centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), pour près de 70 % des bâtiments, et les bureaux d'études Dupaquier, Enertech, Costic, Etamine, Omegawatt, Adret, ITF, Manaslu et Pouget Consultants.

L'Ademe et la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN) du ministère du Développement durable ont également confié au Cerema la **capitalisation nationale** de ces suivis-évaluations à vocation opérationnelle.

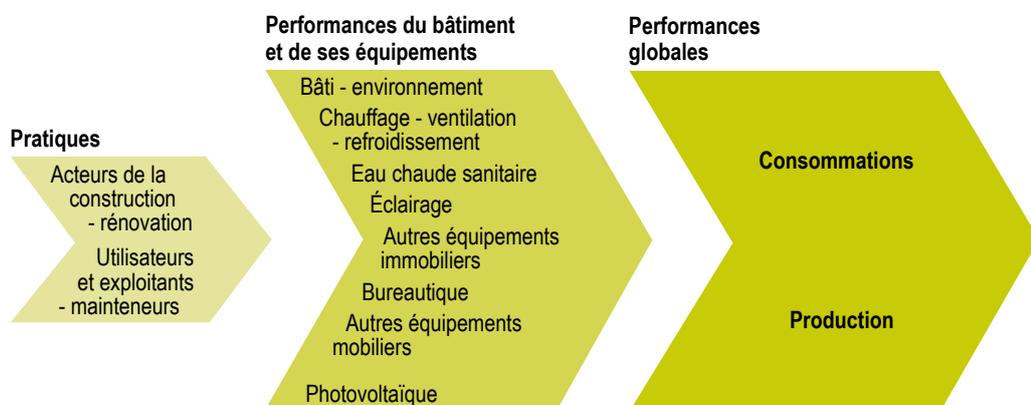
Cette capitalisation est consolidée chaque année au fil de l'augmentation de la taille de l'échantillon des opérations évaluées, avec production d'un rapport. Mais elle s'inscrit d'ores et déjà dans une cohérence finale d'ensemble, structurée par objectifs.

2. Une capitalisation d'enseignements opérationnels

Cette capitalisation s'adresse aux acteurs de la construction-rénovation, de l'utilisation, de la gestion ou de l'entretien, pour qu'ils puissent opérer des améliorations dans leurs bâtiments relativement aux consommations énergétiques et au confort, que celles-ci soient d'ordre technique ou organisationnel, voire comportemental.

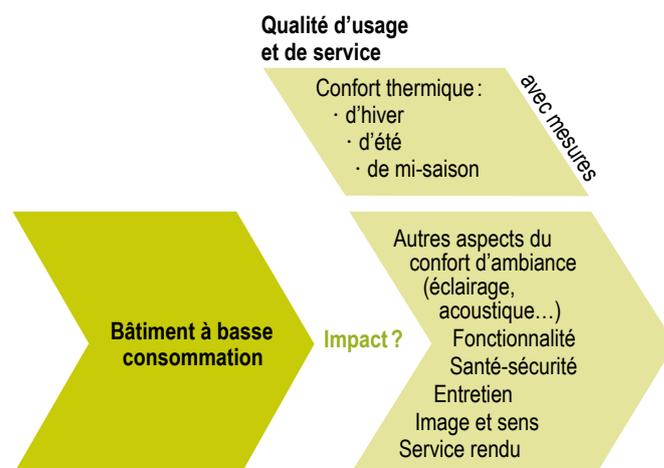
Elle a donc pour but de tirer des enseignements qui permettent d'améliorer principalement la **performance énergétique** des bâtiments, tant sur le plan technique (des performances par composant aux performances plus globales) que sur celui des pratiques des acteurs (Illustration 1).

Illustration 1 – Objectifs détaillés de la performance énergétique



La capitalisation porte aussi sur le niveau de **qualité d'usage et de service rendu** de ces bâtiments basse consommation (Illustration 2), avec approfondissement du confort thermique (mesures) et mise en évidence de l'impact que peut avoir un niveau plus élevé de performance énergétique.

Illustration 2 – Objectifs détaillés de la performance d'usage et de service rendu



Enfin, la capitalisation porte sur les **coûts** constatés d'investissement et de fonctionnement, et leur cumul dans le temps, à savoir le coût global.

3. Une capitalisation progressive

La capitalisation a débuté en 2013 à partir des résultats essentiellement quantitatifs de 13 opérations suivies par le Cerema. Elle a été consolidée et complétée en 2014 sur la base d'un échantillon de 32 évaluations. En ont été tirés des enseignements portant sur la performance énergétique relative aux postes de consommation réglementés, ainsi que sur le confort thermique d'été.

La capitalisation 2015 s'est étendue à 60 évaluations et a élargi le traitement de la **performance énergétique du bâtiment au regard de tous les postes de consommation**, qu'ils soient ou non dans le champ d'application de la réglementation thermique. Elle a également été complétée par les premiers enseignements d'ordre humain.

La présente capitalisation 2016 compte maintenant **119 évaluations réalisées de 2012 à 2016**. Les analyses techniques ont été particulièrement approfondies, complétées et consolidées, notamment sur le plan quantitatif, mais aussi qualitatif. Les installations de production d'électricité photovoltaïque ont été ajoutées au chapitre de la performance des équipements. Et les traitements sociologiques bénéficient d'enseignements quantifiés sur des indicateurs clés tels que la qualité d'appropriation des différents systèmes ou l'appréciation du confort, avec un suivi qui se poursuivra au fil des prochaines capitalisations.



Le nombre d'opérations concernées peut être plus réduit selon le sujet traité.

Il peut se réduire encore en fonction des données disponibles. Les conclusions ne peuvent alors être considérées comme définitives.

Les enseignements quantitatifs peuvent être plus particulièrement à relativiser quand la taille de leur échantillon est encore faible.

L'**impact des pratiques** des acteurs bénéficie d'enseignements, tant globaux que spécifiques à certains équipements, qui dans ce cas sont mis en évidence pour les distinguer des considérations techniques.

Quant à la qualité d'usage, les résultats portent principalement sur le **confort thermique**, mais sont complétés par des retours sur une perception plus globale du confort qui touche aux autres aspects de l'usage, avec un approfondissement des situations en été et un traitement des situations en mi-saison.

Pratiques des acteurs et qualité d'usage font chacun l'objet d'un chapitre, mais aussi d'enseignements disséminés dans les parties relatives aux performances des différents équipements.

Enfin, la **performance économique** commencera à être traitée.

La capitalisation sera consolidée et complétée annuellement au fil de l'augmentation de la taille de l'échantillon, avec plus de 200 évaluations à son terme, en 2018-2019.

4. Un échantillon diversifié d'opérations à basse consommation

Parmi les 119 suivis-évaluations de l'échantillon 2016 :

- 60 ont été réalisés par des bureaux d'études, avec des méthodes variées;
- 59 ont été effectués par le Cerema, avec utilisation du moteur de calcul dynamique et réglementaire Th-CE 2005 pour des simulations comparatives.



Du fait de leur date de construction, les bâtiments étudiés ont été **soumis à la RT 2005** (et non à la RT 2012) ou à la RT des bâtiments existants.

D'où l'utilisation du moteur de calcul dynamique de la RT 2005 pour les analyses dans les suivis-évaluations du Cerema.

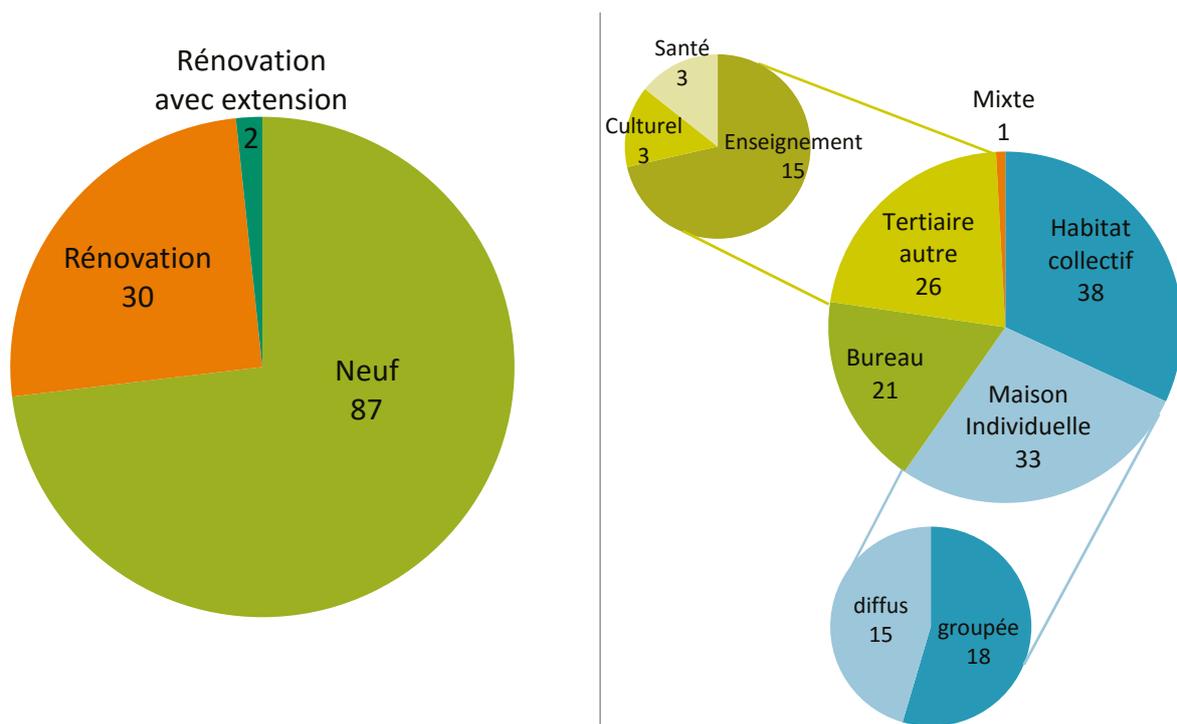
Les **mesures** ont été réalisées durant deux ans, **entre début 2009 et mi 2015**.

Cet échantillon couvre un ensemble varié de **types de bâtiment**, tant dans la nature des travaux (neufs, de rénovation ou mixant les deux), que dans la nature de leur fonction (ou destination d'usage au sens de la réglementation thermique). Toutefois, l'échantillon est constitué majoritairement :

- d'opérations neuves (70 %);
- et d'habitat (60 %).

Dans le tertiaire, les fonctions les plus représentées sont majoritairement les bureaux (17 % du total de l'échantillon) et l'enseignement (12 % du total de l'échantillon).

Illustration 3 – L'échantillon en natures de travaux et fonctions représentées



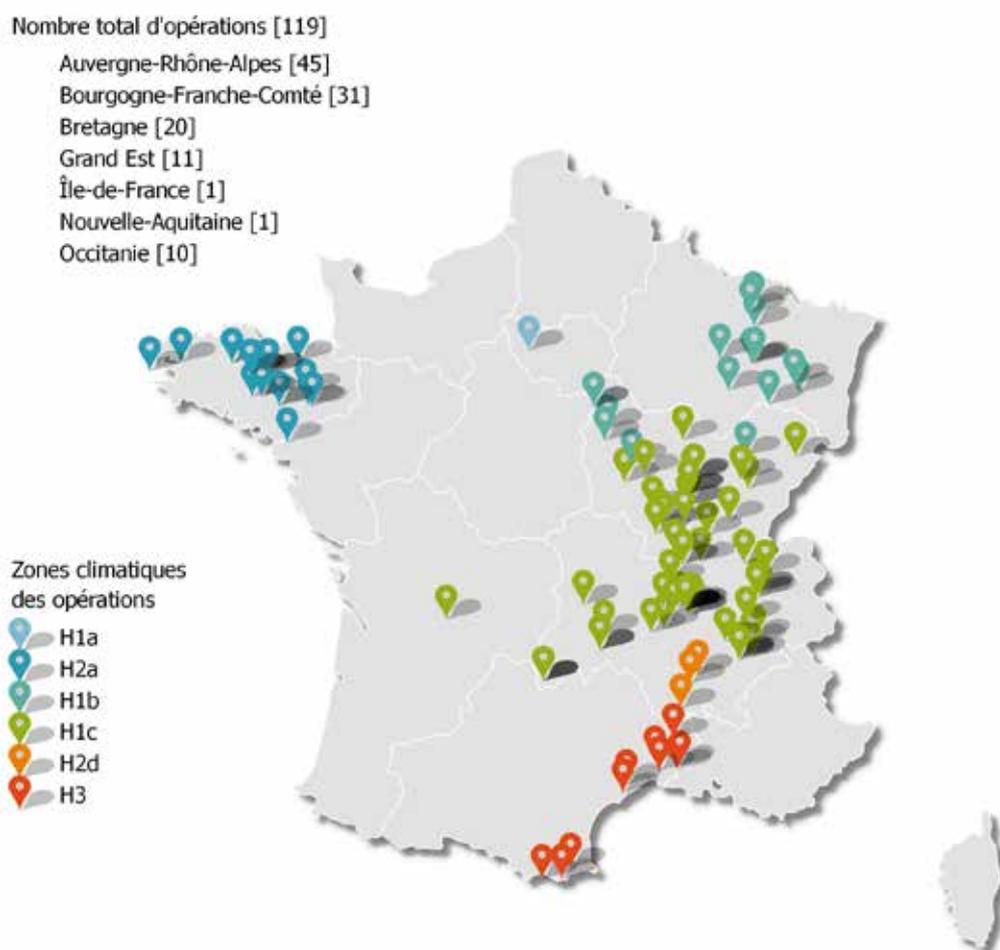
Les surfaces hors œuvre nettes (SHON) des bâtiments s'étendent de 60 m² pour une maison individuelle neuve à 290 m² pour une maison individuelle rénovée, de 205 m² pour un petit logement collectif neuf à 7300 m² pour la rénovation d'un grand ensemble de logements collectifs, de 310 m² à 8890 m² pour des bâtiments de bureaux, et de 430 à 3300 m² pour des bâtiments d'enseignement.

La majorité des opérations sont constituées d'un rez-de-chaussée ou de deux niveaux, mais certains bâtiments, principalement de logements collectifs, peuvent dépasser cinq étages.

La **répartition géographique** de l'échantillon est concentrée dans la moitié Est de la France, autour de l'axe Perpignan-Nancy, ainsi qu'en Bretagne, avec par ailleurs, une opération en Île-de-France et une autre en Limousin. Mais une plus grande diversité de situations est rencontrée :

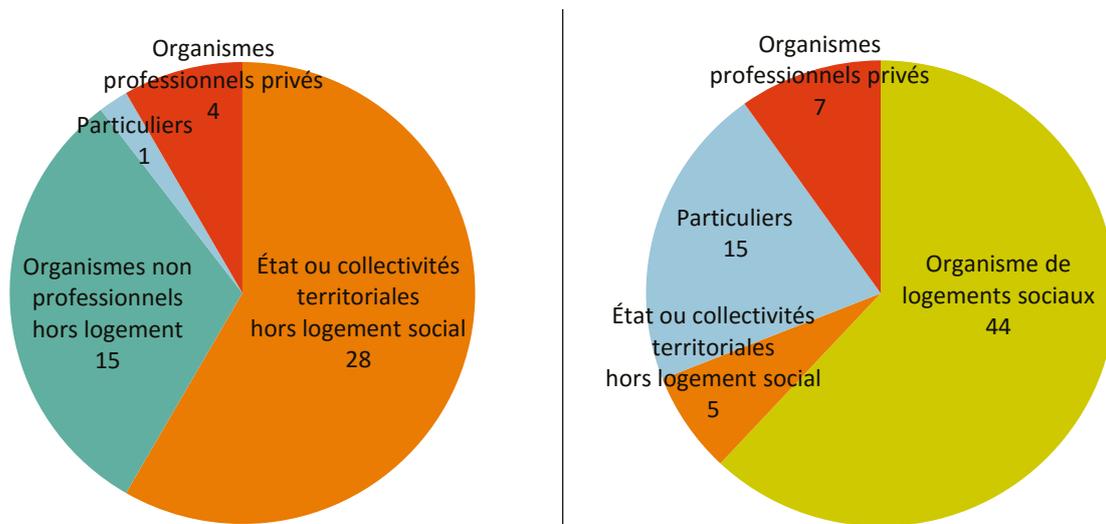
- en zones climatiques d'hiver et d'été couvertes ;
- en altitude, s'échelonnant jusqu'à 1200 m, en plaine majoritairement, mais avec sept bâtiments en montagne et un sur le littoral ;
- et en environnement urbain, majoritairement en ville ou périurbain, mais aussi en zone rurale (un quart des opérations) et en site isolé (cinq bâtiments).

Illustration 4 – Répartition géographique de l'échantillon



Concernant les natures des **maîtres d'ouvrage**, l'échantillon comprend 61 % de bailleurs sociaux (avec essentiellement de l'habitat collectif), 21 % de particuliers (habitat individuel diffus), 11 % de professionnels privés (1/3 de maisons groupées, 1/3 de collectif, puis 2 bureaux, un hôtel et un EPAHD), et 7 % de constructions publiques.

Illustration 5 – Les différentes natures de maîtres d’ouvrage de l’échantillon



Dans l'échantillon étudié, l'habitat collectif, en majorité social, utilise des **techniques** traditionnelles, telles que la structure béton ou la maçonnerie, l'isolation par laines minérales ou plastiques alvéolaires et le chauffage par chaudières gaz à condensation à 61 %. Pour notre échantillon la ventilation est assurée d'abord par de la ventilation double flux, suivie de la VMC hygroréglable.

Concernant la maison individuelle, au contraire, dans notre échantillon le mode constructif le plus représenté est l'ossature bois avec laines minérales ou isolants bio-sourcés intégrés (§ 4.1). Le chauffage est assuré aussi par des chaudières gaz, mais dans une proportion moins importante que dans le logement collectif (à 44 % contre 61 %), et avec une grande multiplicité d'autres types de production de chaleur.

Parmi les bâtiments de bureaux de notre échantillon, majoritairement portés par des promoteurs privés, on rencontre dans une même proportion de la structure bois, du béton et de la maçonnerie (parpaing en neuf ou maçonnerie ancienne en rénovation). L'isolation en ouate de cellulose ou en fibre de bois est présente de manière plus importante dans notre échantillon qu'en logement collectif à proportion quasi égale de la laine minérale d'une part, et d'un plastique alvéolaire d'autre part. Dans notre échantillon, le chauffage est assuré majoritairement par pompe à chaleur, suivie de la chaudière gaz. La ventilation est assurée essentiellement par du double flux.

Enfin, concernant les bâtiments d'enseignement à maîtrise d'ouvrage publique, on en trouve plusieurs à structure mixte (bois/maçonnerie ou bois/béton) et d'autres avec isolation en ouate de cellulose. Le chauffage est assuré par des moyens plus divers que pour les autres tertiaires (chaudière gaz, PAC, chaudière bois et réseau de chaleur urbain).

Comme le montre l'histogramme suivant, la **performance énergétique** visée dans l'étude thermique réglementaire des bâtiments de l'échantillon est **globalement supérieure au niveau d'exigence du label « Bâtiment Basse Consommation » (BBC)**, et ce, quelle que soit la fonction du bâtiment.

Illustration 6 - Consommation de l'étude thermique réglementaire et niveau correspondant du label BBC pour les bâtiments tertiaires

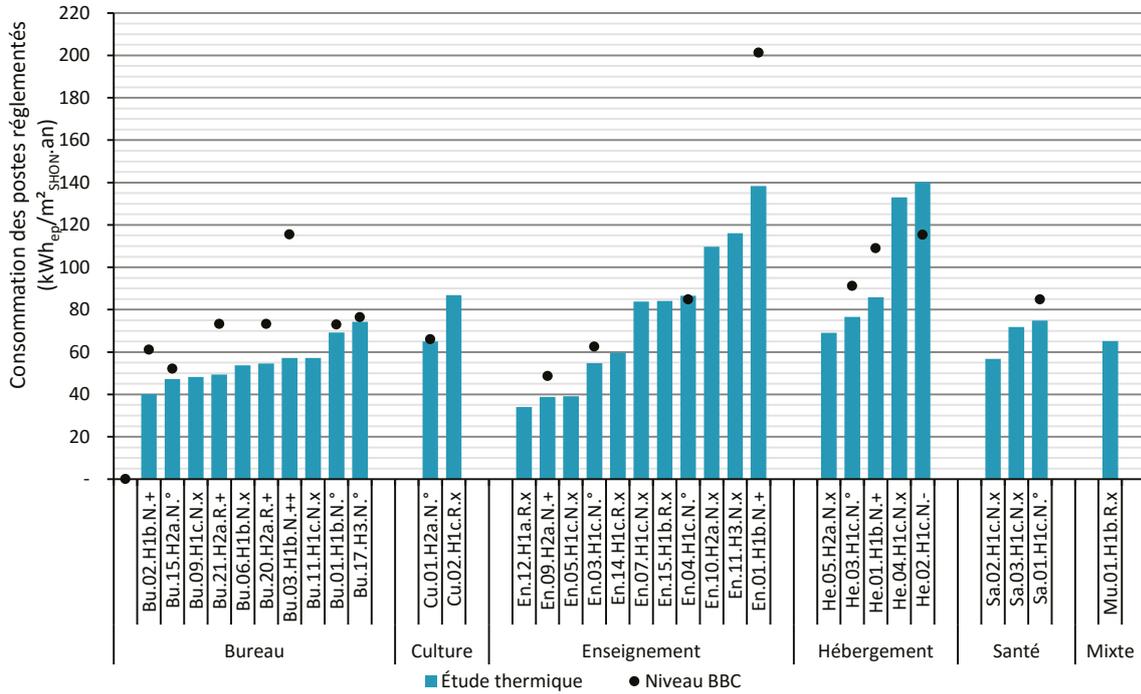
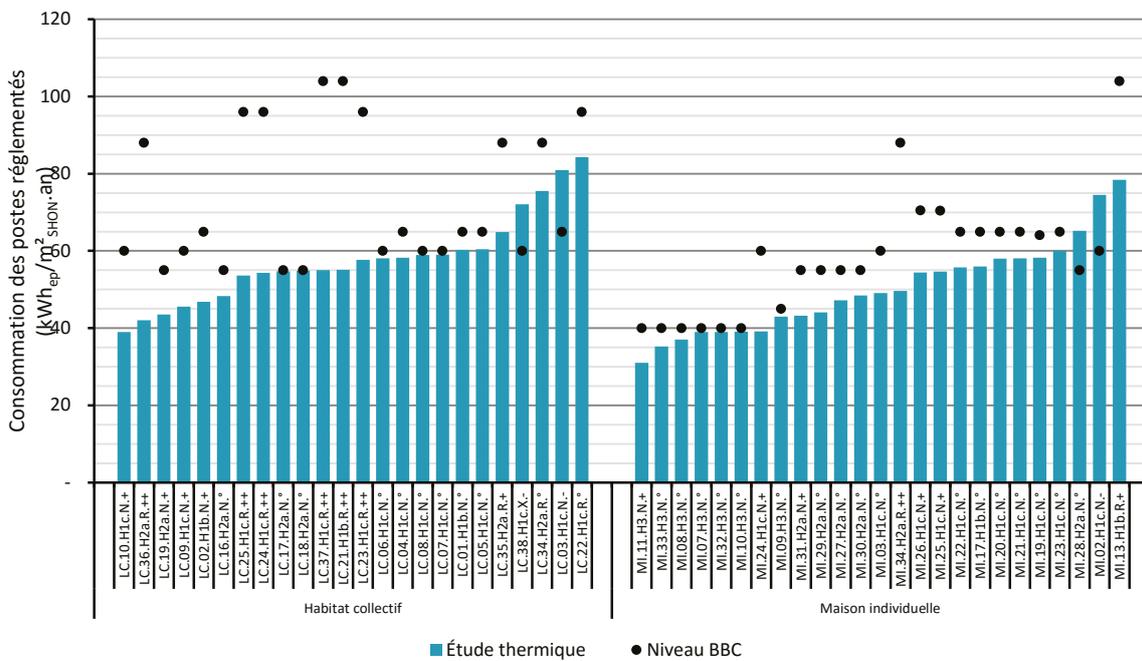


Illustration 7 - Consommation de l'étude thermique réglementaire et niveau correspondant du label BBC pour les bâtiments d'habitation



5. Des définitions et conventions de présentation des résultats

Les définitions et conventions de présentation des consommations présentées dans ce rapport sont les suivantes.

Dans ce document, les **consommations** sont données en **énergie primaire et par surface hors œuvre nette (SHON)**, sauf indication contraire : $(\text{kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2_{\text{SHON}}.\text{an})$.

Pour simplifier, cette unité sera notée : $\text{kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2.\text{an}$.

Les coefficients de conversion en énergie primaire retenus sont de 2,58 pour l'électricité et de 1 pour les autres énergies.

De manière générale, les **surfaces** (en m^2) sont par défaut en SHON.

Méthode de calcul réglementaire Th-CE 2005 (ou, en raccourci, *méthode Th-CE 2005*) : méthode de calcul thermique des bâtiments neufs utilisée obligatoirement lors de la construction de bâtiments neufs soumis à la réglementation thermique (RT) de 2005 en France métropolitaine.

Les différentes natures de données de consommation

Elles sont définies comme suit, avec une couleur spécifique pour faciliter leur lecture dans les histogrammes.



Consommation de l'étude thermique réglementaire : résultat du calcul d'énergie primaire consommée en phase d'utilisation du bâtiment objet de la demande de permis de construire, suivant la *méthode de calcul réglementaire Th-CE 2005*.



Consommation recalculée avec le paramètre constaté : consommation calculée suivant la *méthode de calcul réglementaire Th-CE 2005*, excepté pour le paramètre analysé qui est remplacé par sa valeur mesurée (ou déduite des mesures et, le cas échéant, des enquêtes auprès des occupants).

Pour l'analyse d'une opération donnée, sont distingués les deux recalculs suivants (Méthode § 4) :



• consommation recalculée suivant la météo et l'occupation observées ;



• consommation recalculée suivant la météo, l'occupation et les performances observées.



Consommation mesurée : consommation d'énergie mesurée par le dispositif expérimental propre à l'évaluation.

Les considérations humaines

Dans les chapitres relatifs aux équipements, les considérations humaines sont mises en évidence comme suit :



pour l'impact des pratiques ;



pour le confort thermique et la qualité d'usage.

La numérotation des bâtiments

Pour faciliter la compréhension des histogrammes ou autres graphiques faisant apparaître différents bâtiments, enrichir leur analyse et permettre les comparaisons, les bâtiments sont identifiés par un **numéro unique**, qui intègre les quatre informations généralement les plus utiles.

Chaque bâtiment est ainsi **numéroté dans sa fonction**, puis complété de sa **zone géographique**, de la **nature des travaux** et du **niveau de performance énergétique** initialement visé, avec la nomenclature suivante :

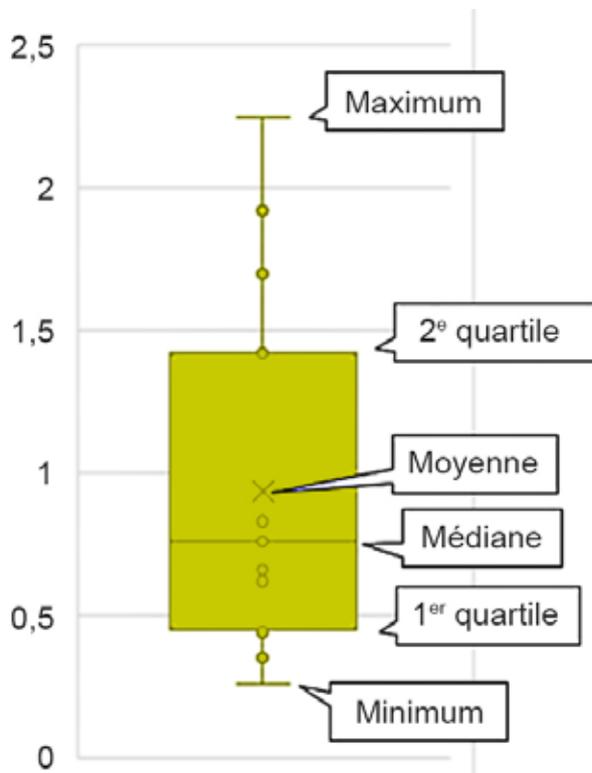
Illustration 8 - Nomenclature de la numérotation des bâtiments de l'échantillon

Code	Signification
1. Fonction du bâtiment	
MI	Maison individuelle (diffus ou groupé)
LC	Habitat collectif [= Logement collectif]
Bu	Bureau
En	Enseignement (école, crèche...)
He	Hébergement (personnes âgées, EHPAD, foyer, hôtel, gîte...)
Re	Restauration
Sa	Santé (hôpital, centre médical...)
Cu	Culture (bibliothèque, salle des fêtes...)
Sp	Sport
Co	Commerce
Mu	Mixte [= Multifonction]
2. Numéro d'ordre	
01, 02, 03...	
3. Zone climatique	
H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d, H3	Nomenclature RT 2000
4. Nature des travaux	
N	Neuf
R	Rénovation
5. Niveau de performance énergétique visé	
++	> 40 % de gain par rapport au niveau du label BBC
+	De 20 à 40 % de gain par rapport au niveau du label BBC
=	Niveau du label BBC à ± 20 %
-	Consommation supérieure de plus de 20 % au niveau du label BBC
x	Information manquante (si besoin)

Exemple : Bu08.H2b.N.- signifie qu'il s'agit du bâtiment de bureaux n° 8, en zone H2b, neuf et avec un niveau de performance à + 20 % de consommation visée par rapport au niveau du label BBC.

La représentation en « boîte à moustache »

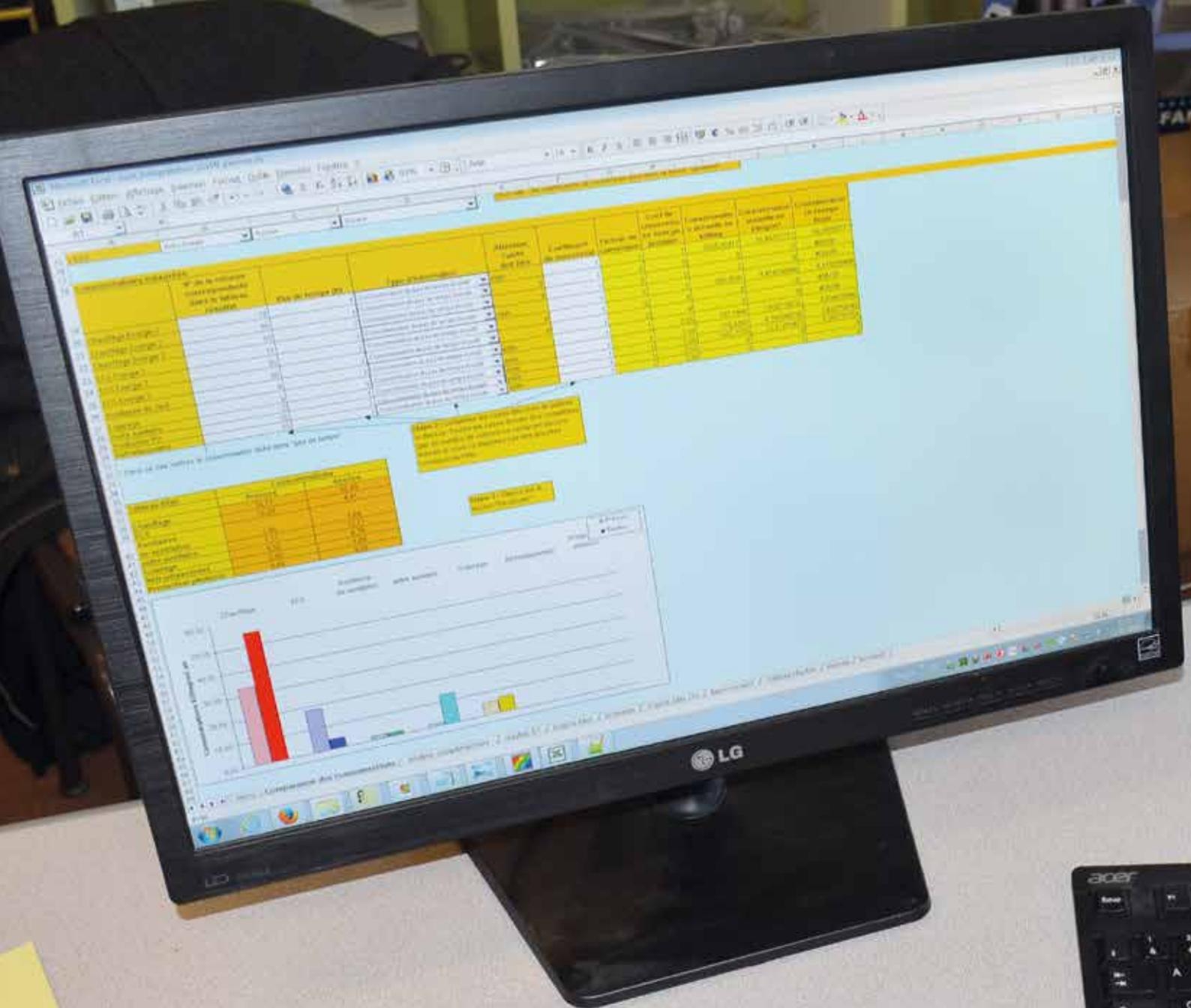
Elle permet de représenter en un seul graphique plusieurs grandeurs statistiques pour un même paramètre, notamment: sa moyenne, son minimum et son maximum.



Figurent également en fin de document, un **glossaire** plus complet (avec rappel des conventions de présentation) et les **abréviations** employées.

Ce **rapport** présente la méthode de suivi-évaluation des performances énergétiques et du confort propre au Cerema, les résultats issus des bâtiments démonstrateurs en conditions réelles d'utilisation, ainsi que les premiers enseignements à destination des acteurs.

WEATHER STATION





MÉTHODE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES ET DU CONFORT

Pour les deux tiers des opérations suivies par le Cerema, les évaluations disposent d'apports supplémentaires par rapport aux opérations suivies par des bureaux d'études, tant en matière de caractérisation des performances que d'analyse des consommations.

1. Une méthode tournée vers la caractérisation *in situ* et l'explication des écarts de consommation

La **performance d'isolation de l'enveloppe du bâtiment** est caractérisée par la mesure, et par enquête auprès des utilisateurs, par déduction de l'équilibre des flux thermiques entrants et sortants de l'enveloppe (§ A.3).

La **température intérieure de consigne** est caractérisée par la méthode d'analyse statistique des températures intérieures mesurées pendant l'occupation et la fourniture du chauffage (§ A.2.3).

Des **explications sur les écarts de consommation** sont tirées de la transposition du calcul de l'étude thermique réglementaire dans les conditions observées de la météo et des modes d'occupation, puis des performances mesurées ou évaluées du bâtiment.

Sont également quantifiés les **effets sur les consommations des variations de la météo, de l'occupation et des performances de l'enveloppe et des installations techniques**.

Concernant l'analyse du confort, la méthode est basée sur l'agrégation de données mesurées de température et d'hygrométrie intérieures en période d'occupation, en utilisant plusieurs indicateurs de confort (§ A.6). En particulier, pour le confort d'été, est calculé le **nombre d'heures d'inconfort selon la norme du confort adaptatif**.

2. Différents objectifs d'évaluation basés sur les mesures

L'instrumentation des opérations lauréates des appels à projets PREBAT et les outils d'analyse des données ont été définis pour satisfaire les différents objectifs suivants :

- situer les performances énergétiques réelles des bâtiments ;
- analyser et expliciter les écarts entre les performances mesurées et celles de l'étude thermique réglementaire (en relevant les écarts éventuels avec le marché des entreprises et la mise en œuvre) ;
- quantifier ces écarts en termes d'impact sur la consommation d'énergie et sur les systèmes énergétiques ;
- évaluer le confort thermique (été et hiver).

3. Une méthode de suivi associant mesure, observation et enquête

Les données nécessaires aux évaluations du Cerema sont récupérées avec les moyens suivants :

- analyse des documents produits aux différentes étapes de la conception du projet et des travaux (pièces écrites, plans et notes de calcul) ;
- visites de chantier pour suivre la mise en œuvre : repérage des écarts entre études et réalisation, et appréciation de la mise en œuvre ;
- thermographie et mesure d'étanchéité ;
- enquête par questionnaire auprès des occupants : recueil des données liées à l'occupation, la gestion et la satisfaction ;
- instrumentation et mesure durant deux ans : le cahier des charges de l'instrumentation a été défini pour pouvoir mesurer d'une part les consommations poste par poste, d'autre part les données mesurables permettant d'interpréter les écarts éventuels entre les consommations calculée et mesurée : données météorologiques (température, hygrométrie, vitesse du vent, rayonnement solaire global horizontal), températures et hygrométries intérieures, fourniture d'eau chaude pour le chauffage, fourniture d'eau chaude sanitaire...

Ces données sont vérifiées, consolidées, puis analysées.

L'analyse des mesures effectuée par le Cerema est double :

- caractériser la performance de l'enveloppe du bâtiment et des systèmes (§ A.3 et A.4) ;
- confronter le calcul à la mesure en identifiant la cause des écarts, et en distinguant notamment ce qui relève des conditions météorologiques et d'occupation, de ce qui relève de la performance du bâtiment (enveloppe, systèmes).

4. Une méthode spécifique d'analyse des écarts entre consommation mesurée et consommation de l'étude thermique

L'objectif principal de l'étude thermique réglementaire est de permettre la comparaison entre des solutions techniques ou des bâtiments de même destination d'usage. La réglementation thermique est en effet de nature performancielle en permettant l'assemblage de caractéristiques architecturales et techniques de manière plus souple et plus large qu'une approche par moyens. Sa finalité n'est pas de prévoir la consommation future.



Les consommations calculées selon la méthode de calcul de la réglementation thermique ne peuvent être comparées directement aux consommations mesurées *in situ*. Les conditions effectives d'occupation et de météorologie peuvent différer des conventions prises dans le calcul réglementaire.

Ainsi, même si le bâtiment est parfaitement réalisé et les systèmes bien installés et réglés, la consommation mesurée ne pourra pas correspondre aux consommations de l'étude thermique réglementaire, sauf si les écarts sur les divers paramètres viennent à se compenser.

Néanmoins, la méthode de calcul de la réglementation utilise une modélisation dynamique du bâti et des équipements, au pas de temps horaire, qui nous permet ici d'identifier les causes des écarts entre les résultats de l'étude thermique et les consommations réelles. Cette approche permet notamment de distinguer ce qui relève des conditions météorologiques et d'occupation, de ce qui relève de la performance intrinsèque du bâtiment et de ses systèmes.

La consommation de l'étude thermique réglementaire doit ainsi être recalculée en prenant en compte la météo locale et l'occupation réelle pour être comparée à la consommation réelle. La consommation Cep obtenue peut alors être considérée comme l'objectif de consommation pour lequel le bâtiment a été conçu.



La comparaison s'effectue par rapport à l'étude thermique réglementaire en phase chantier. La qualité de l'étude thermique a été vérifiée pour limiter les imprécisions (exactitude des caractéristiques des produits et matériaux mis en œuvre).

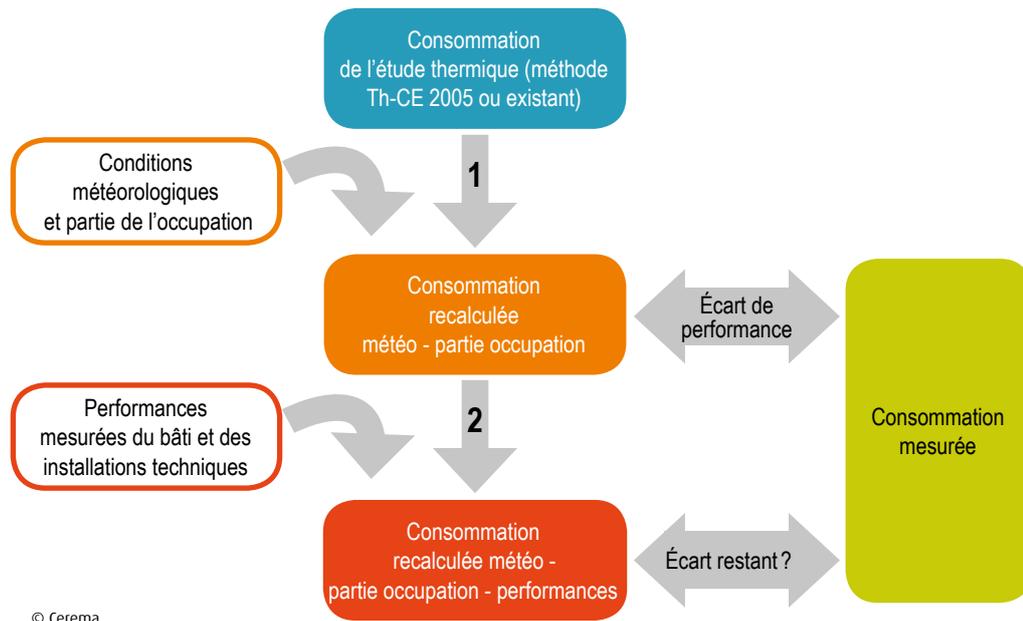
Toutefois, certaines caractéristiques de l'étude thermique, telles que la perméabilité à l'air, sont celles qui sont prises en compte comme objectif, pour être comparées aux valeurs réelles mesurées à la réception.

L'outil retenu pour les suivis du Cerema est le moteur de calcul Th-CE 2005 de la réglementation thermique en version « faisabilité en approvisionnement d'énergie »¹ pour le neuf, ou Th-CE ex pour les rénovations. Les raisons en sont les suivantes :

- nous pouvons disposer des fichiers de données d'entrée du projet, fournis au format xml par les BET, car le calcul selon la méthode de calcul de la réglementation thermique est obligatoire ;
- l'objectif de performance est exprimé vis-à-vis de la réglementation thermique : une consommation en énergie primaire, généralement au niveau du label BBC ;
- utiliser les mêmes règles de calcul permet de comparer les consommations des différentes opérations et facilite ainsi la capitalisation.

1. La « faisabilité » est basée sur le moteur de calcul Th-CE 2005 (ou Th-CE ex) avec certaines données conventionnelles ouvertes, tels les scénarios d'occupation et les apports internes ou le volume d'ECS puisé.

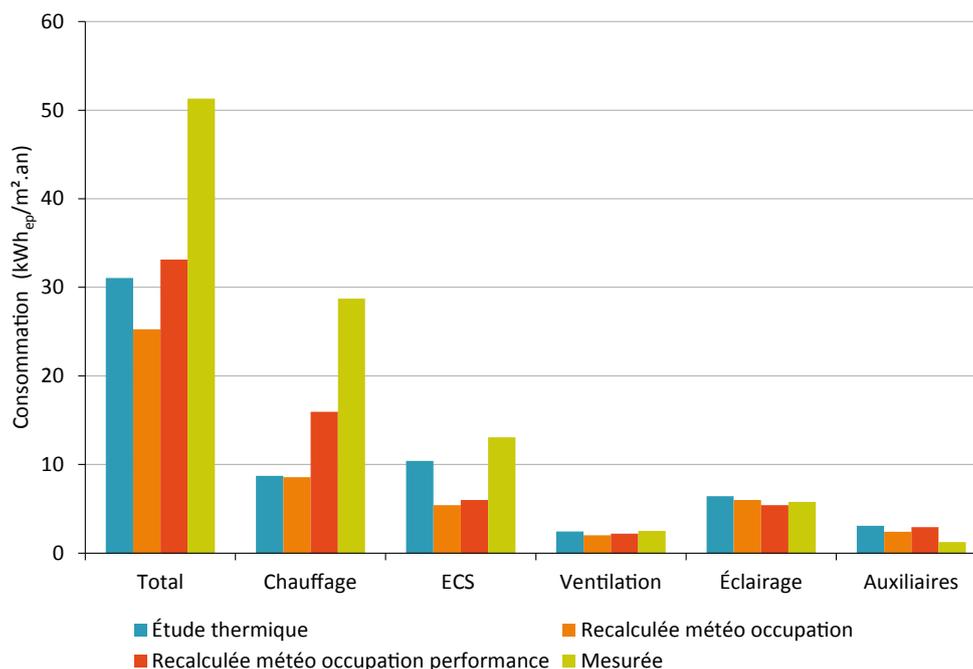
Illustration 9 – Comparaisons entre consommation mesurée et consommations recalculées de l'étude thermique réglementaire



L'approche retenue se déroule donc en trois étapes :

1. **recalcul du Cep avec les conditions environnementales de l'année de suivi**: le Cep (météo + partie de l'occupation) comprend la prise en compte de la météo (§ A.1) et d'une partie des conditions d'occupation de l'année de suivi (§ A.2) ;
2. **recalcul de la consommation de l'étude thermique avec la performance réelle du bâti et des systèmes**: le Cep (météo + partie de l'occupation + performances) comprend, outre la prise en compte de la météo et d'une partie de l'occupation de l'année de suivi, la performance observée sur l'enveloppe (§ A.3) et sur les systèmes (§ A.4) ;
3. interprétation des écarts restants non modélisables avec la méthode à disposition.

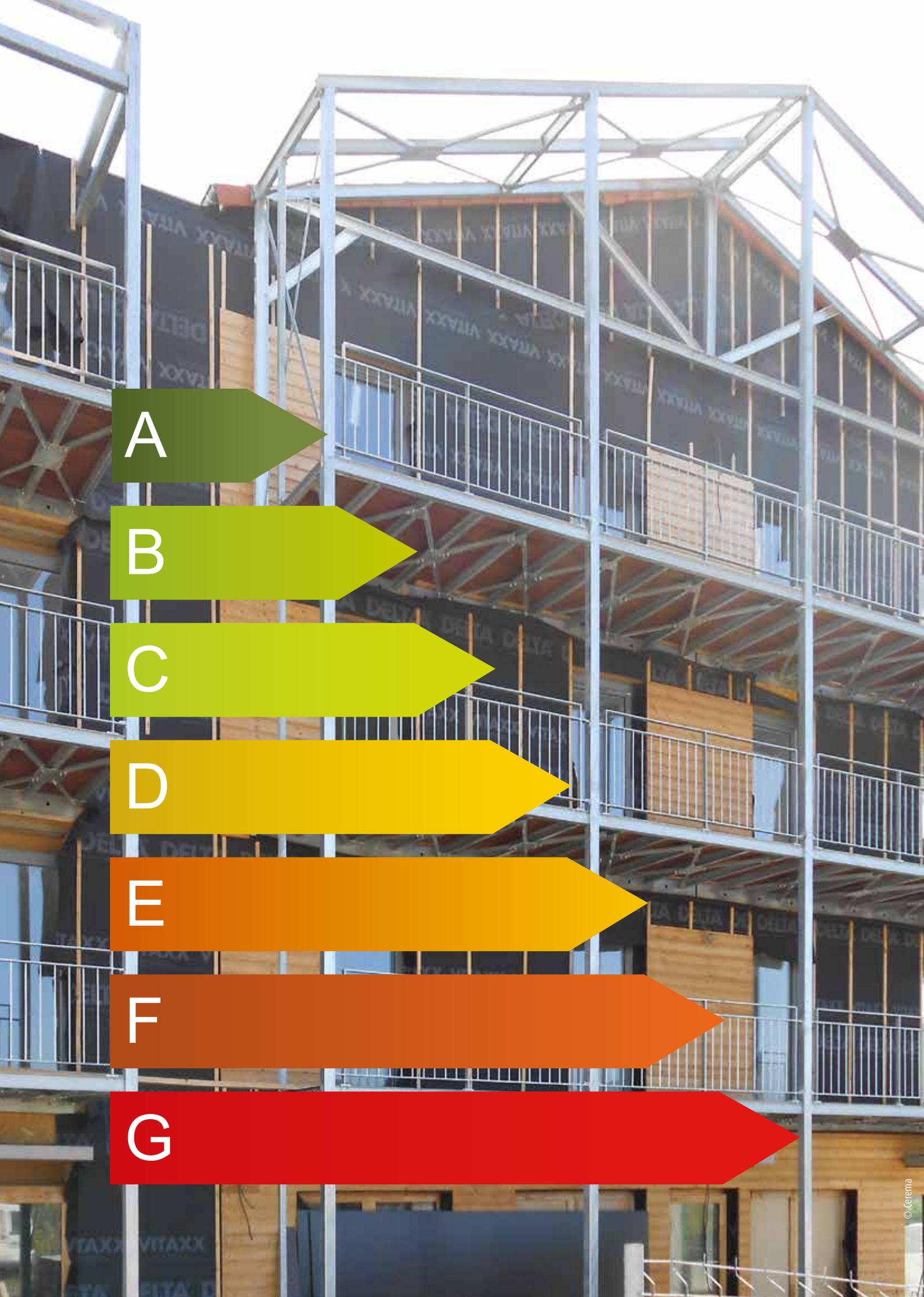
Illustration 10 – Exemple de comparaison des Cep calculées, recalculées et mesurées



Limites de la méthode :

Toutes les observations relevées lors du suivi ou de l'analyse des mesures ne peuvent pas être prises en compte dans le recalcul, du fait que :

- les scénarios d'ouverture des fenêtres ne sont pas accessibles et modifiables dans le logiciel à disposition du Cerema. De plus, la modélisation des ouvertures des fenêtres est délicate en soi : il faudrait connaître le taux d'ouverture des fenêtres et les pressions intérieure et extérieure pour calculer les débits, ce qui ne peut pas être réalisé dans le cadre des suivis ;
- le scénario de gestion des protections solaires n'est pas modifiable (par exemple, les occupants peuvent fermer plus souvent les volets, pour des raisons d'intimité ou de sécurité) ;
- les débits de ventilation ne sont pas modifiés, car ils ne sont pas mesurés dans le cadre des suivis ;
- les apports internes physiologiques (occupants) évalués à partir d'enquêtes sont imprécis ;
- les défauts de réglage sont difficilement modélisables en général ;
- les horaires de réduit de la température de consigne ne sont pas modifiables. Or on peut observer en résidentiel un fonctionnement réduit de nuit et en inoccupation, voire parfois, dans certains logements collectifs fonctionnant au chauffage collectif, une absence de réduit.



A

B

C

D

E

F

G

Consommations, productions et performances d'ensemble

L'essentiel

À partir des mesures effectuées, les niveaux de consommation peuvent être établis par poste et par destination d'usage (bureaux, tertiaire autre, habitat collectif, maisons individuelles). Différentes répartitions peuvent être dressées, notamment entre les postes de consommation réglementés et les postes non réglementés.

Les résultats montrent combien, pour les bâtiments à basse consommation, les évolutions sont marquées. De nouveaux enjeux apparaissent, notamment sur les postes non réglementés en bâtiment de bureau et en habitat, leur consommation devenant importante en comparaison de celle des postes réglementés.

La consommation des cinq postes réglementés peut varier de 20 à 160 kWh_{ep}/m².an selon les opérations, mais une plus grande homogénéité est logiquement constatée par destination d'usage. Une baisse est également observée entre les deux premières années suivies. Sa répartition par poste a toutefois évolué : le poste chauffage reste le plus important, mais la consommation de ventilation voit sa part augmenter, notamment en bureaux, et le poste d'eau chaude sanitaire devient important en habitat.

Quant à la production d'électricité photovoltaïque, elle ne semble pas influencée par les conditions météorologiques, et atteint parfois un niveau supérieur à la consommation totale du bâtiment, faisant de ce dernier un bâtiment « à énergie positive ».

La consommation mesurée du bâtiment est le premier indicateur de sa performance réelle d'ensemble et sans doute le plus simple. Cependant, savoir juger, à la lumière de celui-ci, de l'atteinte ou non des objectifs fixés à la conception est loin d'être simple : notamment une comparaison abrupte avec la consommation de l'étude thermique réglementaire n'aurait pas de sens (comme avec tout autre résultat de calcul prévisionnel réalisé à la conception). La méthode développée par le Cerema permet de répondre à cette question en s'affranchissant des paramètres météorologiques et d'occupation et d'expliquer en grande partie les écarts.

À l'issue de l'application de cette méthode à 24 bâtiments, il apparaît que les performances attendues à la conception sont atteintes pour 14 bâtiments. Néanmoins les consommations observées sur les 10 autres bâtiments se situent bien en deçà de celles des bâtiments de la génération précédente, construits suivant la RT 2005. La performance thermique de l'enveloppe ainsi que la température de consigne sont les paramètres les plus impactants sur la consommation recalculée pour une majorité des opérations de notre échantillon.

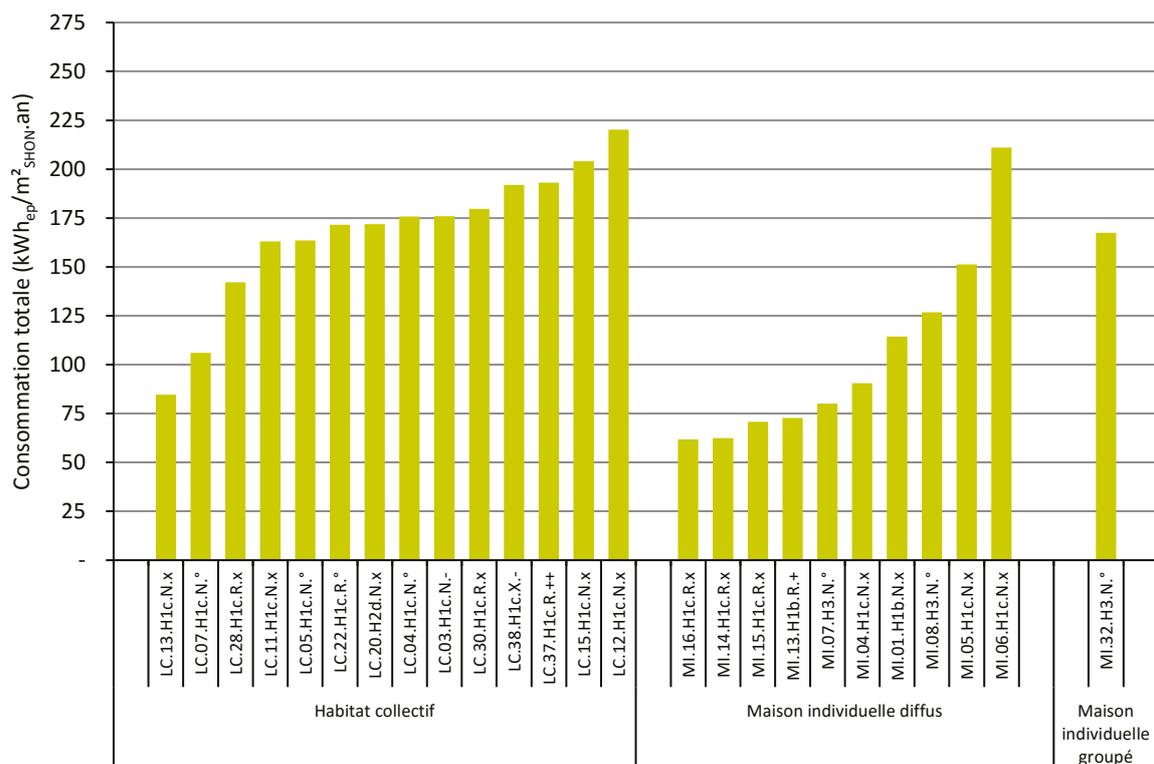
1.1 Consommation totale mesurée

La consommation totale comprend :

- les **postes de consommation réglementés** : chauffage, refroidissement, production d'eau chaude sanitaire, auxiliaires des systèmes thermiques, auxiliaires de ventilation et d'éclairage ;
- les **postes non réglementés** : autres équipements immobiliers (ascenseurs, portes automatiques, pompes de relevage, systèmes de sécurité incendie, gestion des accès...) et équipements mobiliers (bureautique, éclairage d'appoint, électroménager, audiovisuel...). Les appareils concernés fonctionnent quasiment tous à l'électricité². C'est pourquoi cet ensemble de postes est également appelé « **électricité spécifique** »³.

La consommation totale mesurée varie de **60 à 220 kWh_{ep}/m²SHON.an** (Illustration 11). Même si son amplitude est la même pour tous les types d'habitat, elle est généralement bien inférieure en maison individuelle, pour de multiples raisons : surface SHON plus élevée, individualisation du pilotage et de la gestion du chauffage et de l'eau chaude sanitaire, absence d'ascenseur, consommation de l'électroménager non proportionnelle au nombre d'occupants, etc.

Illustration 11 – Consommations totales mesurées en habitat

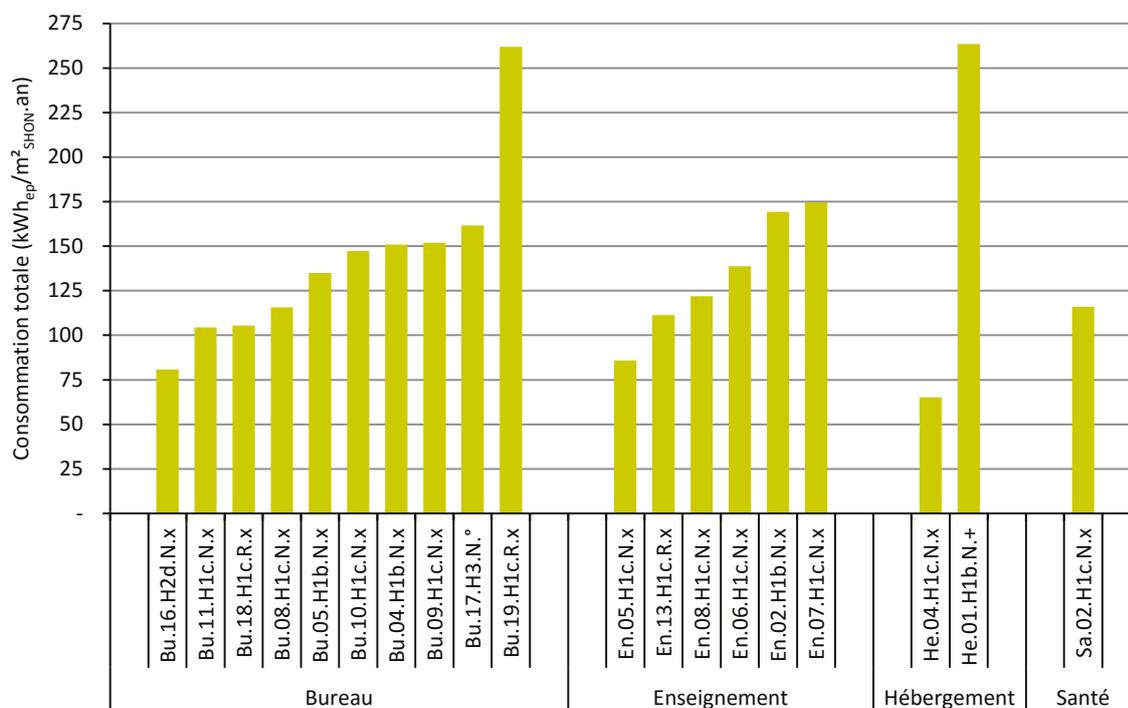


Nota : le trop faible échantillon en maisons individuelles groupées ne permet pas de dégager d'enseignements.

2. Car, mis à part le gaz pour la cuisson, les autres sources d'énergie ne sont pas utilisées pour ces équipements dans notre échantillon de bâtiments.
3. Par différenciation avec l'énergie électrique consommée par l'éclairage et les équipements thermiques et leurs auxiliaires, soumise à la réglementation thermique.

Avec des durées d'occupation moindres, les **bâtiments tertiaires de bureaux et d'enseignement** présentent des consommations totales s'étalant généralement de 80 à 160 kWh_{ep}/m².an (Illustration 12) logiquement inférieures par rapport à l'habitat, notamment collectif.

Illustration 12 - Consommations totales mesurées en tertiaire



Nota: les trop faibles échantillons en hébergement ou bâtiments de santé ne permettent pas de dégager des enseignements.

1.2 Répartition des postes de consommation

1.2.1 Une part importante des postes non réglementés

La consommation mesurée des postes non réglementés de notre échantillon se situe généralement entre 20 et 80 kWh_{ep}/m².an (Illustrations 13 et 14) et représente un tiers à la moitié de la consommation totale (Illustrations 15 et 16), excepté pour les écoles⁴ et crèches (fonction « Enseignement » sur les graphiques) où elle est plus faible (autour de 20 kWh_{ep}/m².an et 20 % de la consommation totale).

Illustration 13 – Consommations mesurées des postes réglementés et non réglementés en habitat

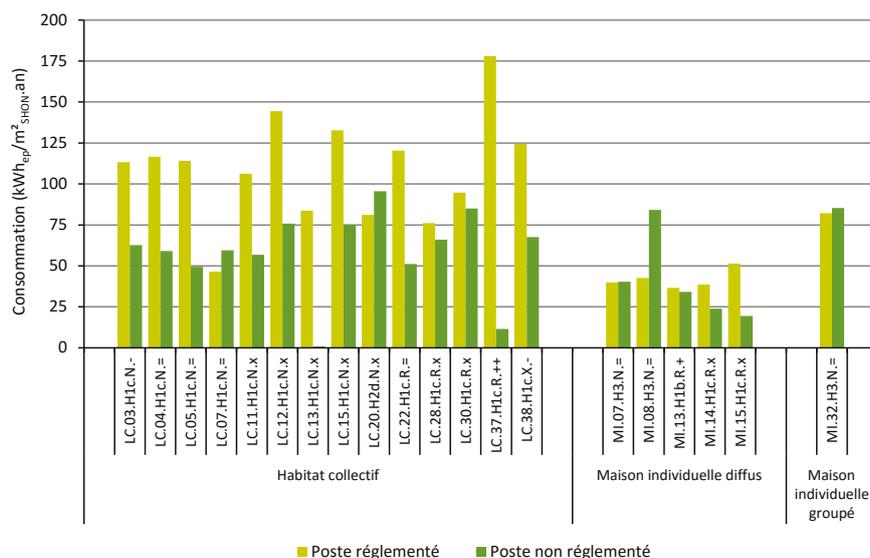
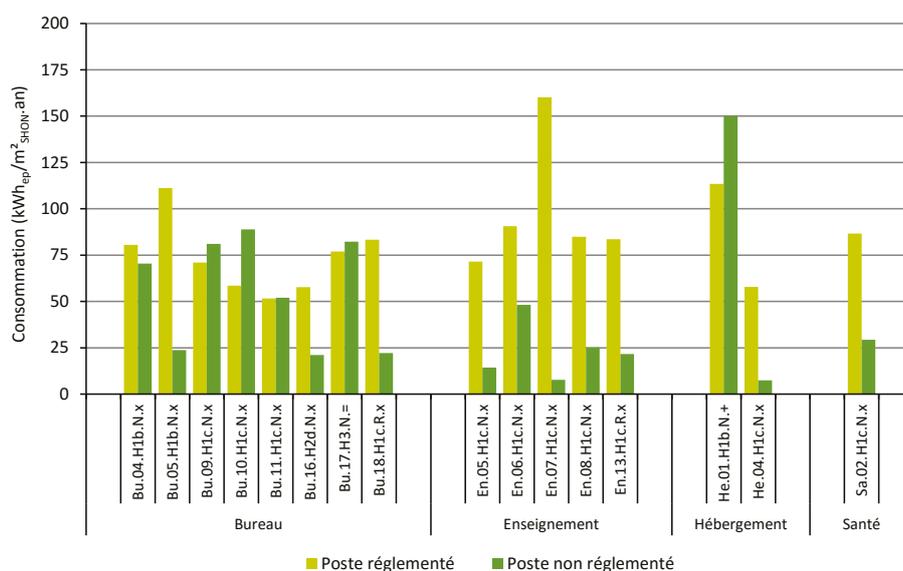


Illustration 14 – Consommations mesurées des postes réglementés et non réglementés en tertiaire*



(*) L'enseignement ne comprend ici que des écoles maternelles et primaires, ainsi que des crèches. Ces résultats ne s'appliquent donc pas aux collèges et lycées.

Pour les bâtiments de bureaux et les maisons individuelles, la part des postes non réglementés est du même ordre que celle des postes réglementés. En bureaux, les consommations proviennent essentiellement de la bureautique et des serveurs informatiques (§ 5.8.1 et illustration 183).

4. Locaux d'enseignement, sans cuisine collective.

En **habitat collectif**, la part des postes non réglementés représente environ 1/3 des consommations totales et se situe **entre 50 et 80 kWh_{ep}/m².an**. Ces consommations sont essentiellement concentrées dans les parties privatives et leurs équipements mobiliers (§ 5.8.1 et illustration 185). En effet, en moyenne, la répartition est la suivante :

- 95 % de consommations d'origine domestique ;
- 5 % de consommation d'électricité spécifique des espaces communs (ascenseur, éclairage de sécurité incendie, interphone, amplificateur de télévision, pompes de relevages...).

Illustration 15 – Parts des postes réglementés et non réglementés dans la consommation totale mesurée en habitat

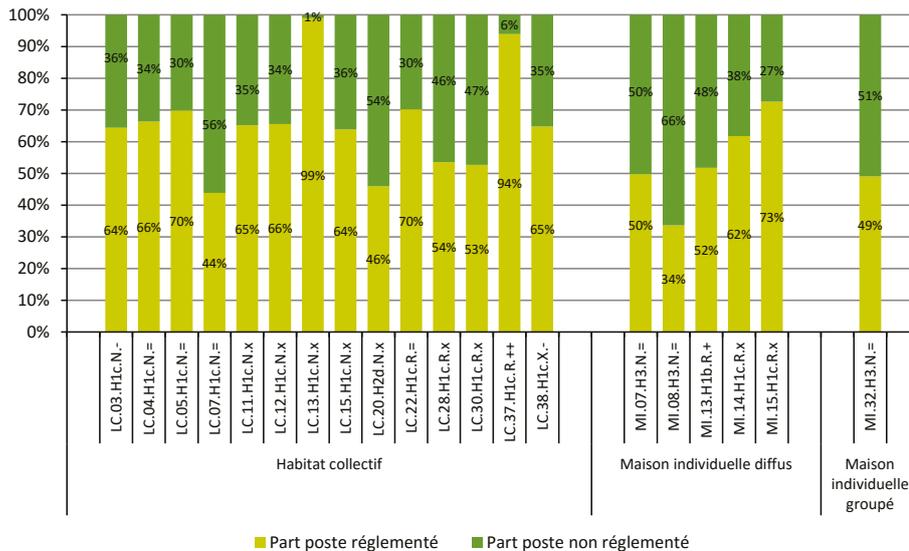
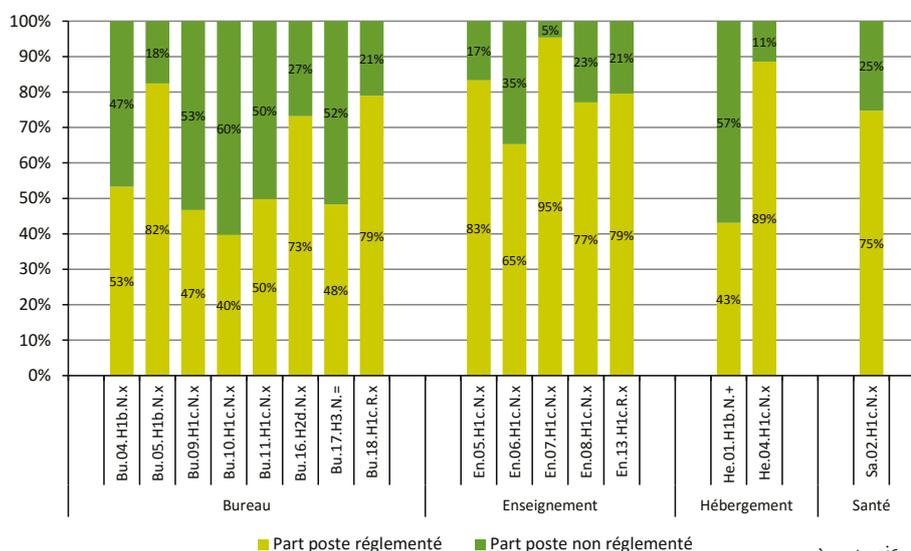


Illustration 16 – Parts des postes réglementés et non réglementés dans la consommation totale mesurée en tertiaire



À retenir

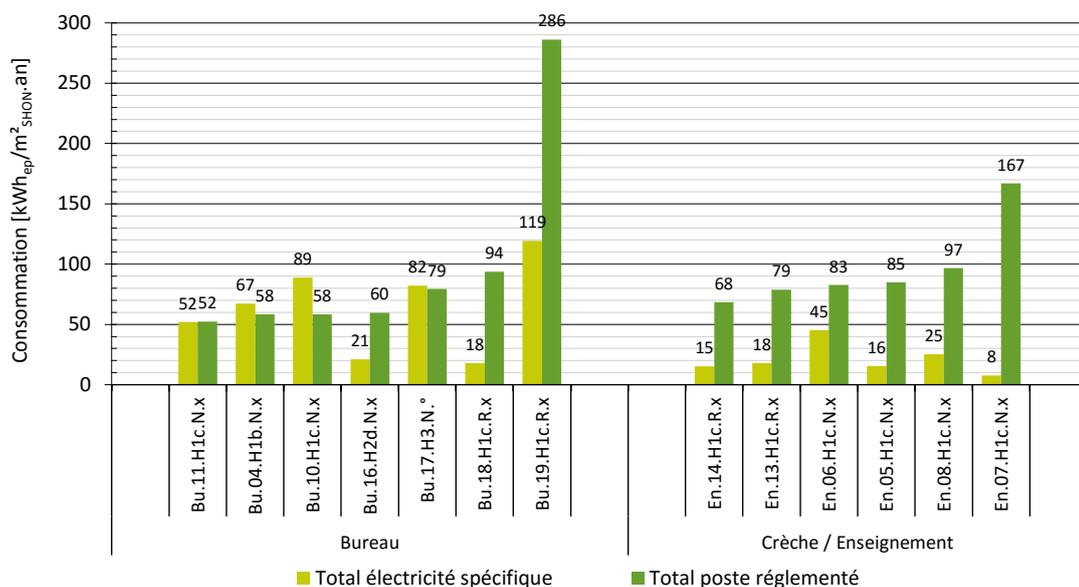
Pour les bâtiments à basse consommation, la part prise par les **postes non réglementés** est importante, de **1/3 de la consommation totale en habitat collectif**, à **la moitié en bureaux et maisons individuelles** (en énergie primaire). Elle est plus basse pour les écoles et crèches, autour de 20 % (et 20 kWh_{ep}/m².an). En habitat collectif elle se situe généralement entre 50 et 80 kWh_{ep}/m².

Beaucoup de variations s'expliquent par l'usage, en raison des différences de durée d'utilisation ou d'intensité (telle la puissance électrique des appareils, ou, pour les postes réglementés, la température de chauffage des locaux), dans la mesure où ces deux paramètres impactent directement et proportionnellement la consommation.

Un gisement potentiel d'économie pour les bureaux

En tertiaire, l'illustration 17 montre très clairement l'importance d'un gisement d'économie pour les bureaux, par rapport au domaine de l'enseignement (écoles et crèches), avec une amplitude de consommation qui peut monter à 120 kWh_{ep}/m².an, mais aussi, à l'opposé, se situer autour de 20 kWh_{ep}/m².an.

Illustration 17 – Consommation mesurée d'électricité des postes non réglementés en tertiaire (en kWh_{ep}/m².an) au regard de la consommation totale des postes réglementés



L'écart dépend à la base, de la proportion des locaux affectés à l'activité bureautique, la consommation étant ramenée à la surface totale du bâtiment, avec des parties hors bureaux, telles que les salles de réunion. Mais il s'explique aussi par le constat de conceptions particulièrement attentives à la limitation des consommations et impliquant l'organisation bureautique, ainsi que par la vigilance des utilisateurs.

À retenir

Pour les bâtiments de bureaux à basse consommation, les postes non réglementés constituent une part importante, qui varie de 20 à 120 kWh_{ep}/m².an en fonction de la surface consacrée à la bureautique, de son organisation, de sa conception et des pratiques des utilisateurs.

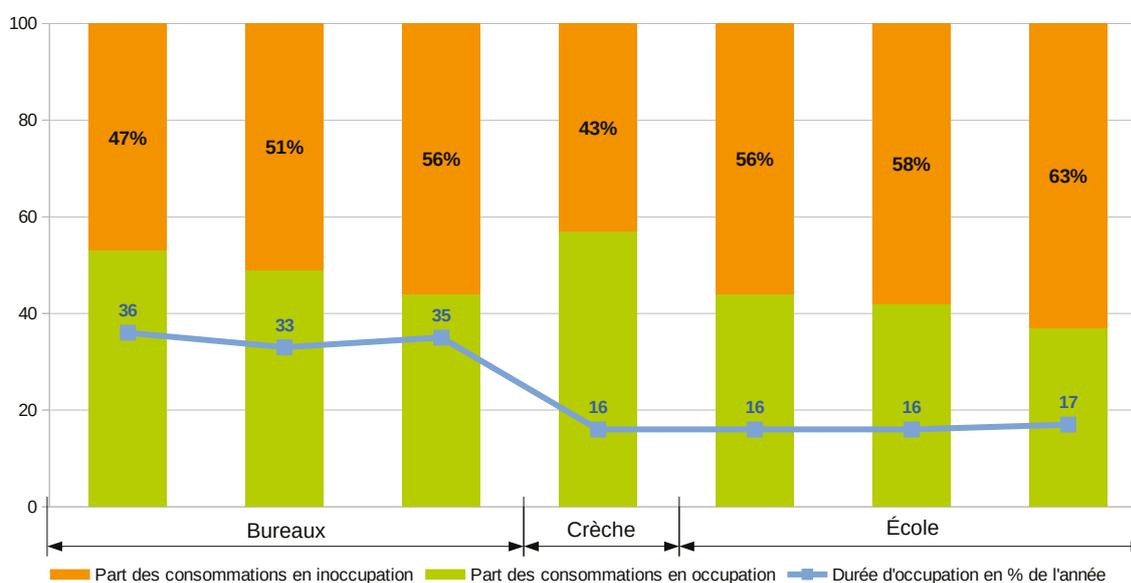
Pour les postes non réglementés, les appareils et les durées d'utilisation sont beaucoup plus variables en fonction des destinations d'usage et des pratiques des utilisateurs, à l'image, en habitat, de la variété des équipements des ménages (électroménager, audiovisuel et informatique) et de leurs durées de fonctionnement. Durées de fonctionnement et durées d'utilisation ne sont d'ailleurs pas souvent en rapport.

Des consommations importantes en période d'inoccupation des bureaux

En considérant les consommations électriques totales (des postes réglementés et non réglementés) de différents bâtiments tertiaires, incluant les auxiliaires de chauffage-ventilation-climatisation (CVC) et l'éclairage, et en différenciant les mesures en période d'occupation et d'inoccupation, nous constatons que **pour les bureaux, la majeure partie des consommations en période d'inoccupation concerne la bureautique, et surtout les serveurs qui fonctionnent en permanence.** Ces deux postes de consommation sont détaillés en § 5.8.

L'illustration 18 donne les mesures dans trois bâtiments de bureaux, trois écoles et une crèche, pour la part de leur consommation en période d'occupation et d'inoccupation en comparaison avec la part du temps d'occupation dans l'année.

Illustration 18 – Répartition des consommations électriques par périodes d'occupation et d'inoccupation et part du temps d'occupation



Dans les bureaux, la part d'électricité consommée en inoccupation représente 50 % de la consommation électrique totale, alors qu'ils ne sont occupés qu'un tiers du temps sur l'année.

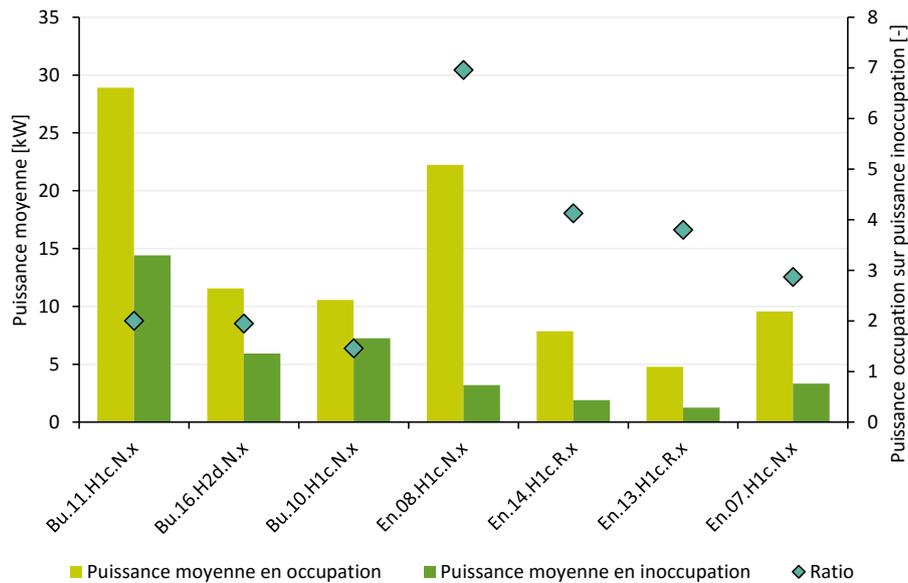
Dans les écoles, occupées environ 15 % du temps, les consommations électriques ont lieu à hauteur de 60 % en période d'inoccupation.

Pour approfondir, les puissances appelées renseignent sur l'optimisation de la période d'inoccupation. En effet, comme celles-ci sont chacune relativement constantes sur leur période, il est possible de les comparer : plus la différence entre elles est élevée, plus les consommations en inoccupation sont optimisées, et inversement.

L'illustration 19 montre un écart de puissance plus faible dans les bureaux : **puissance appelée seulement divisée par 2** en inoccupation, contre 3 à 4 pour les écoles et 7 pour la crèche.

Malgré un échantillon d'analyse restreint, cela semble confirmer le potentiel d'économie des bâtiments de bureaux en période d'inoccupation.

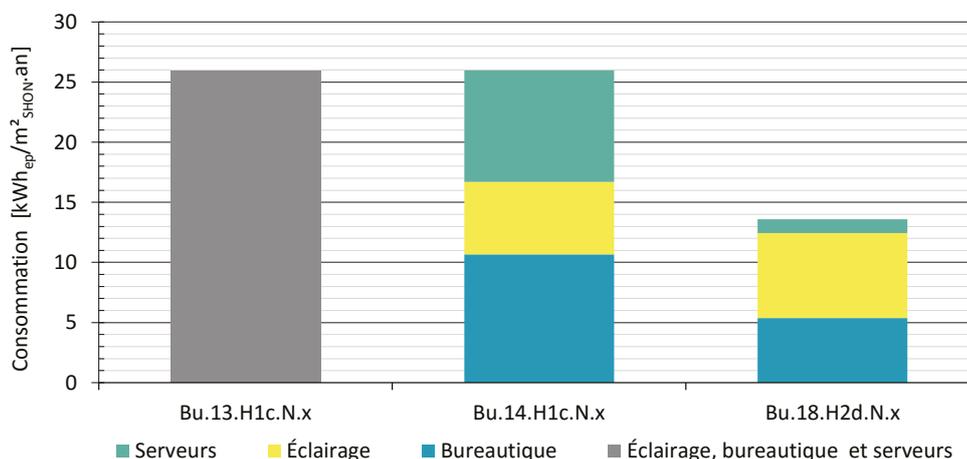
Illustration 19 – Puissance moyenne appelée en périodes d'occupation et d'inoccupation



Dans les bâtiments de bureaux, ces consommations en inoccupation proviennent :

- des équipements électriques de chauffage-ventilation-climatisation (CVC), notamment les centrales de traitement d'air (CTA), qui fonctionnent en permanence ;
- de l'éclairage, de la bureautique et des serveurs, l'ensemble atteignant 26 kWh_{ep}/m².an en inoccupation pour deux des trois bâtiments suivis.

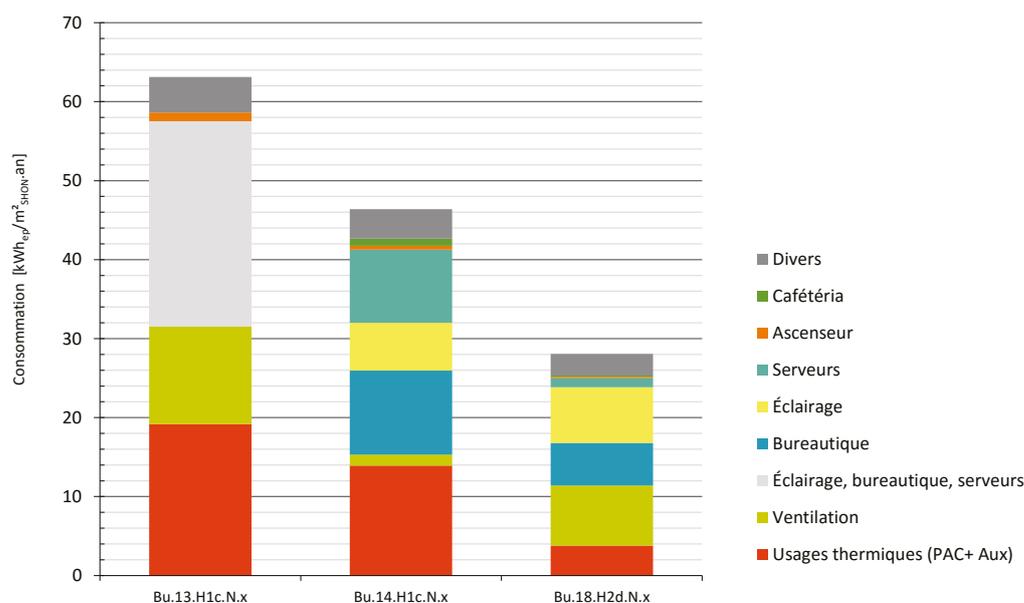
Illustration 20 – Consommations de l'éclairage, de la bureautique et des serveurs en inoccupation dans les bureaux (en kWh_{ep}/m².an)



Pour les écoles, ces consommations proviennent également des CTA fonctionnant en permanence (25 kWh_{ep}/m².an en période d'inoccupation dans le cas analysé, voir illustration 21).

Pour les écoles et la crèche, l'éclairage nocturne est également en cause, avec une consommation en inoccupation comprise entre 7 et 11 kWh_{ep}/m².an, surtout due à l'éclairage extérieur, et probablement à la veille du pilotage des installations intérieures.

Illustration 21 – Répartition des consommations électriques en inoccupation dans les écoles (en kWh_{ep}/m².an)



À retenir

Malgré un faible échantillon d'analyse, il semble que dans les bâtiments de **bureaux** la part d'**électricité consommée en période d'inoccupation** représente 50 % de la consommation électrique totale, avec une puissance appelée maintenue à la moitié. D'où un potentiel d'économie important, notamment en diminuant les durées de fonctionnement dans cette période pour les équipements pour lesquels c'est possible.

Des abonnements électriques surdimensionnés

La réduction des consommations présentant aussi un intérêt financier, il peut également être intéressant de tirer des enseignements sur le dimensionnement de l'abonnement électrique.

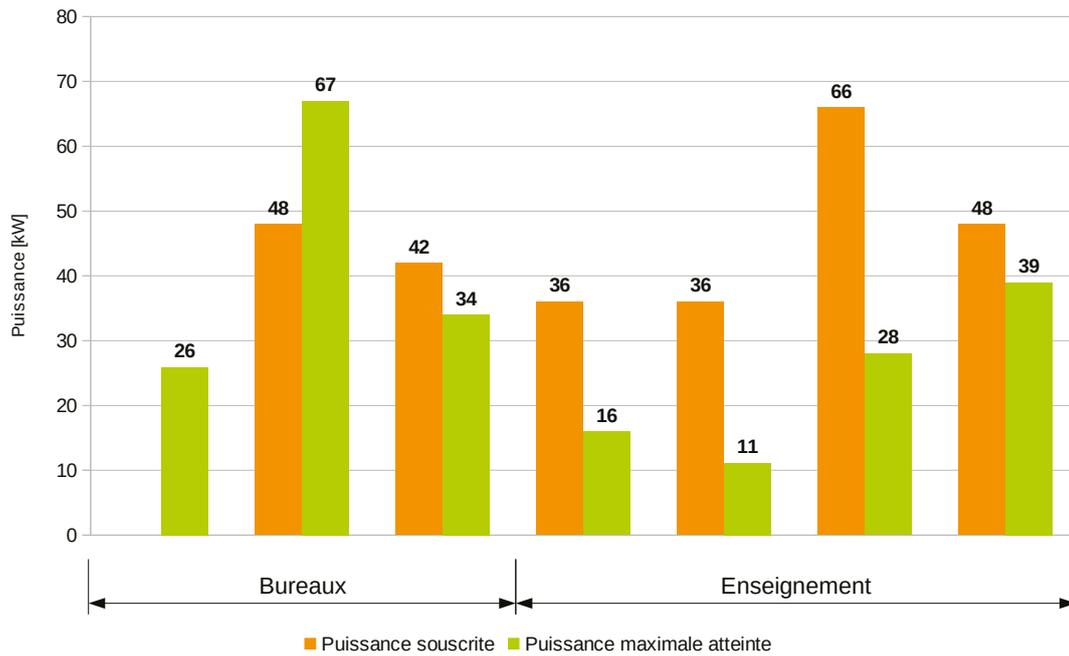
Une campagne de mesures a permis de déterminer la puissance maximale appelée et de la comparer à la puissance souscrite dans 3 bureaux, 4 écoles, une crèche, ainsi que dans 5 logements d'un immeuble collectif.

L'illustration 22 montre, par comparaison avec la puissance souscrite, que celle-ci est bien dimensionnée pour les bureaux (pour le bureau n° 2, la puissance appelée ne dépasse que très ponctuellement la puissance souscrite).

En revanche, elle est systématiquement surdimensionnée dans les écoles et crèches.

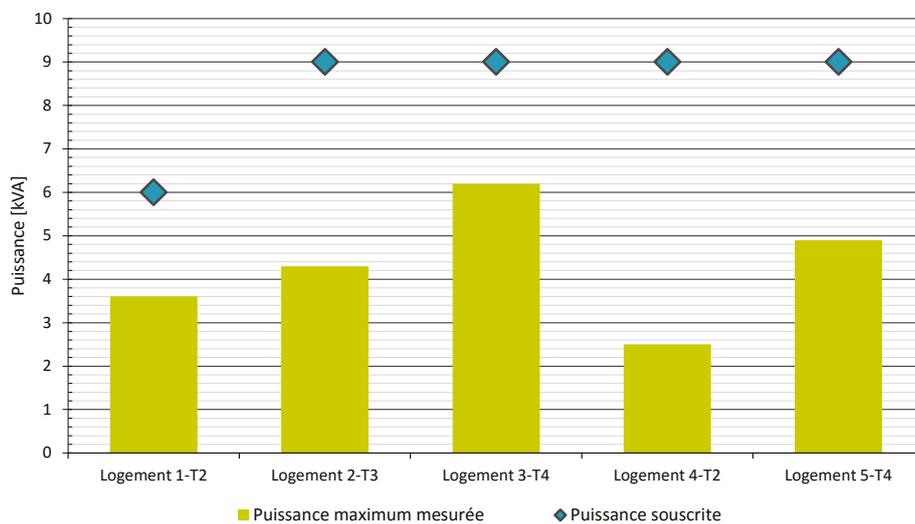
« Sur une opération, un branchement a été fait en tarif jaune, alors qu'un branchement en tarif bleu aurait suffi. »

Illustration 22 – Puissance souscrite et puissance maximale atteinte en tertiaire



En logement, les résultats indiquent que la puissance souscrite est souvent bien supérieure à la puissance maximale nécessaire. Si le chauffage n'est pas électrique, 6 kVA semblent suffire pour un T2, et entre 6 et 9 kVA pour des T3 et T4 en fonction des équipements domestiques.

Illustration 23 – Puissance souscrite et puissance maximale atteinte en appartement



Cette surpuissance se traduit par des surcoûts de fonctionnement et peut engendrer un surinvestissement.

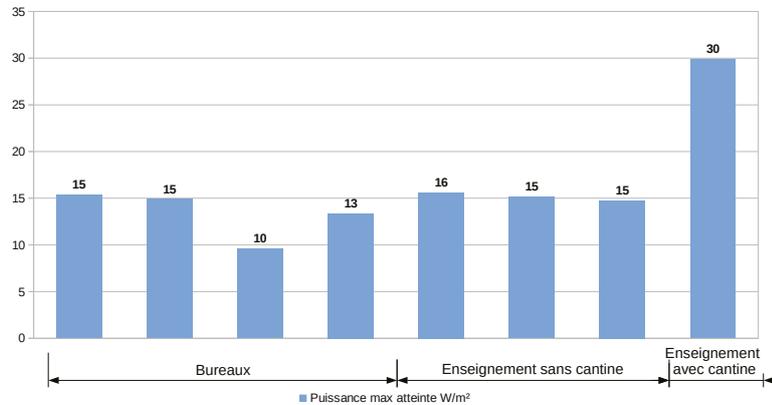
À retenir

Les abonnements électriques semblent souvent surdimensionnés, notamment dans le domaine de l'enseignement.

Pré-dimensionnement des abonnements

L'illustration 24 donne la puissance maximale atteinte dans l'année, ramenée à la surface SHON du bâtiment.

Illustration 24 – Puissance maximale atteinte par m²



Malgré la taille restreinte de l'échantillon, une valeur de 15 W/m² se dégage pour les bureaux et les écoles, à équipements CVC similaires (sans chauffage à effet joule ni climatisation), et double avec la cuisine pour une des écoles.

1.2.2 Une répartition des postes réglementés en évolution

Par rapport aux illustrations 11 et 12 précédentes, la consommation globale des cinq postes réglementés porte ici sur des échantillons plus importants, permettant alors de mieux l'apprécier.

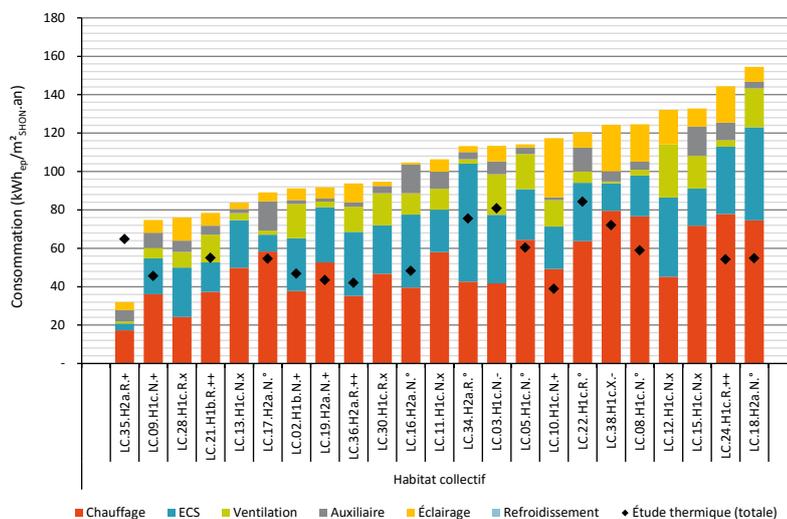
Sa décomposition par poste est donnée par fonction des bâtiments dans les graphiques ci-après, en valeur absolue et en pourcentage.

Habitat collectif

La consommation des cinq postes réglementés varie généralement de 80 à 140 kWh_{ep}/m².an, valeurs plus élevées qu'en tertiaire du fait d'une durée d'occupation plus importante.

Elles se situent en deçà de la valeur moyenne du parc construit suivant la RT 2005.

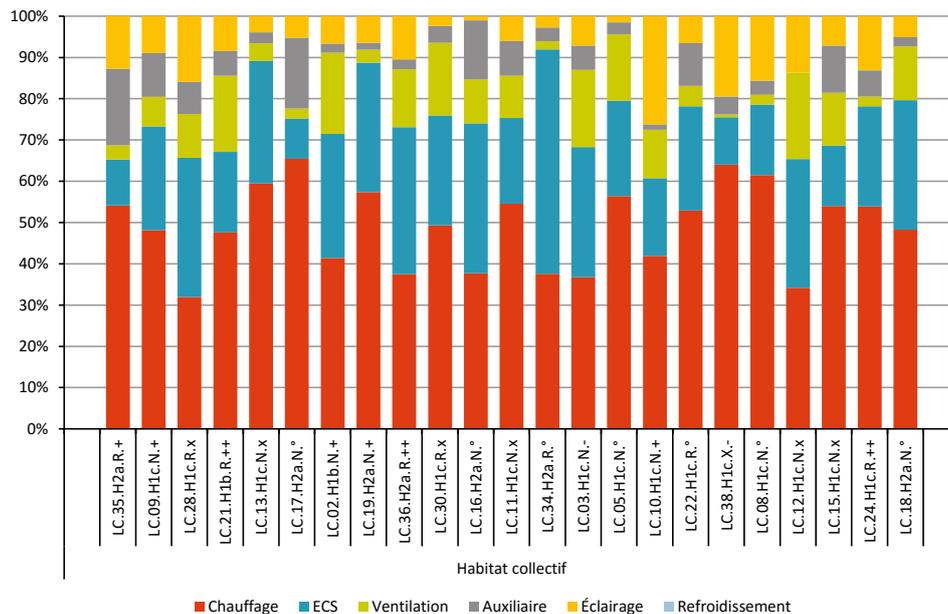
Illustration 25 – Répartition en valeurs de la consommation mesurée des postes réglementés⁵ et valeur de l'étude thermique réglementaire



5. Le poste « chauffage » inclut parfois les auxiliaires.

En habitat collectif, le poste « éclairage » ne comprend pas toujours la consommation à l'intérieur des logements (mesure uniquement des parties communes).

Illustration 26 – Répartition en pourcentages de la consommation mesurée des postes réglementés



Maison individuelle

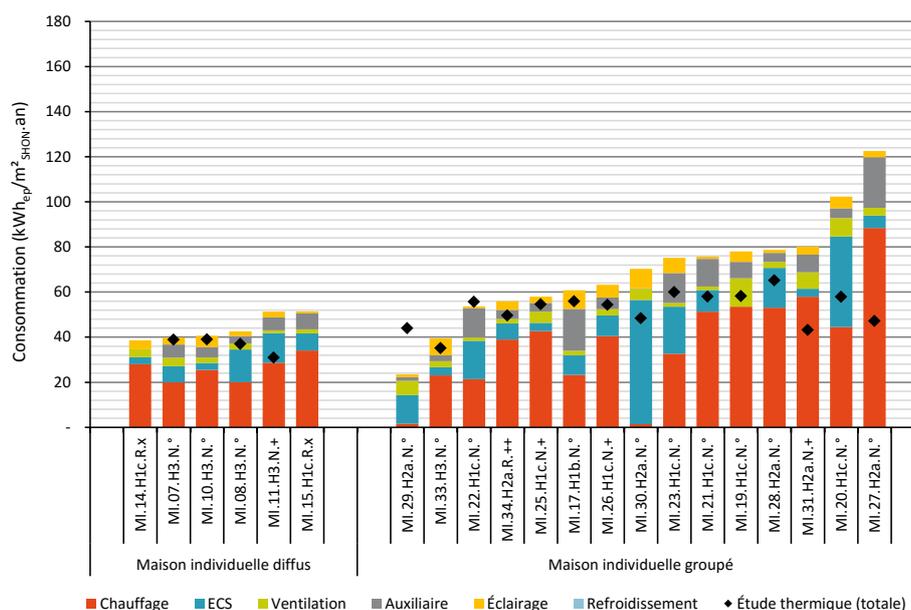
Pour les maisons individuelles, la consommation des cinq postes réglementés varie généralement de :

- 40 à 50 kWh_{ep}/m².an en diffus ;
- 40 à 100 kWh_{ep}/m².an en groupé.

Ce niveau plus faible que dans l’habitat collectif s’explique notamment par le fait que l’énergie est ramenée ici à la surface SHON, proportionnellement plus importante en parties extérieures au volume chauffé (notamment en diffus).

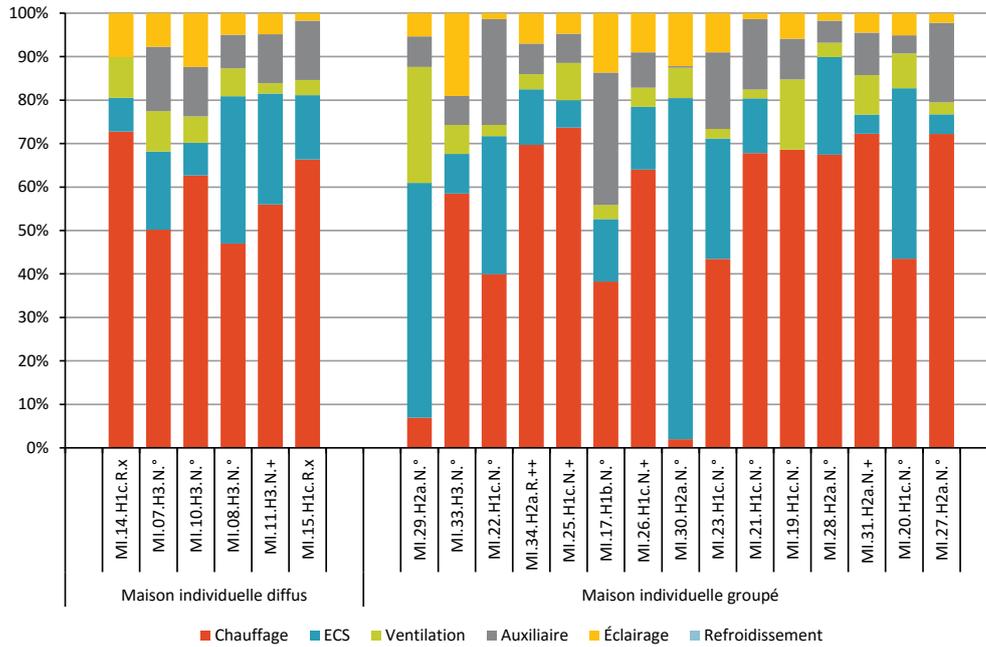
Il se situe bien en deçà de la valeur moyenne du parc construit suivant la RT 2005.

Illustration 27 – Répartition en valeurs de la consommation mesurée des postes réglementés⁶ et valeur de l’étude thermique réglementaire



6. Le poste « chauffage » inclut parfois les auxiliaires.

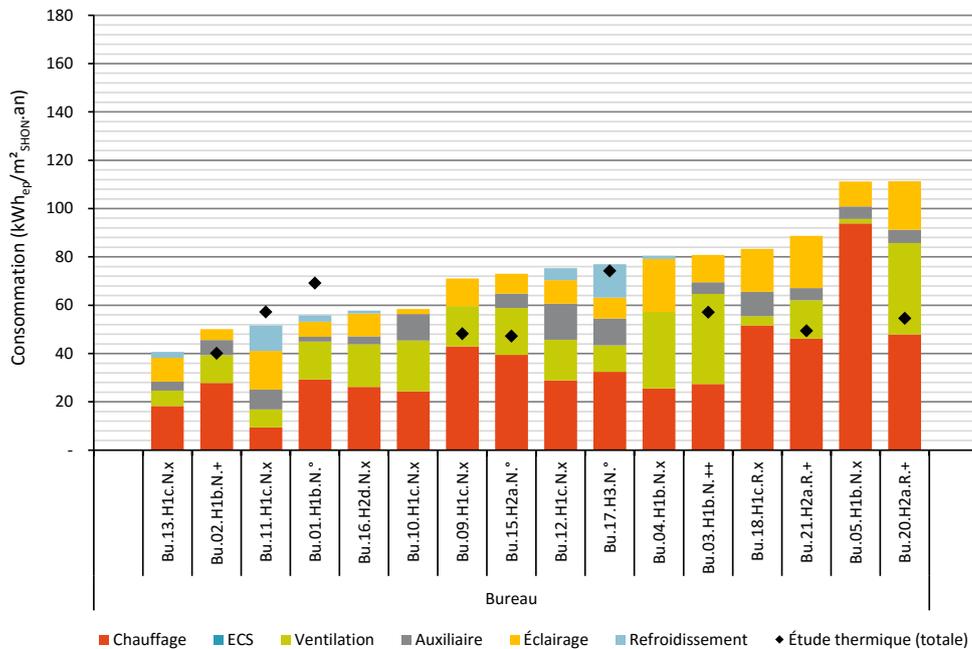
Illustration 28 – Répartition en pourcentage de la consommation mesurée des postes réglementés



Bureaux

Pour les bureaux, la consommation des cinq postes réglementés varie généralement de 50 à 80 kWh_{ep}/m².an.

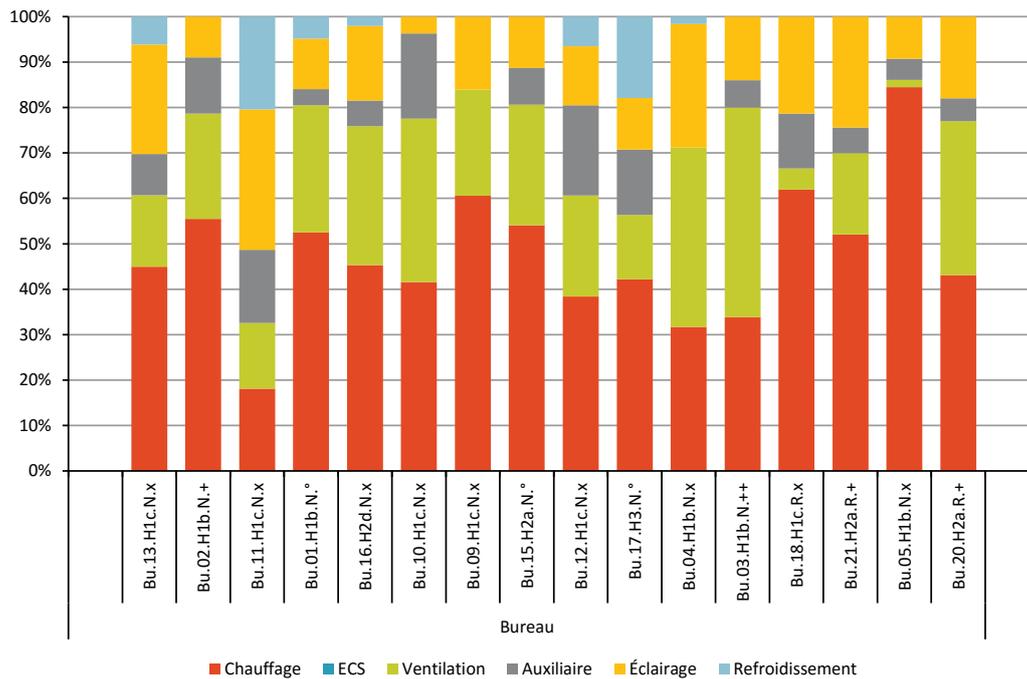
Illustration 29 – Répartition en valeurs de la consommation mesurée des postes réglementés⁷ et valeur de l'étude thermique réglementaire



7. Le poste « chauffage » inclut parfois les auxiliaires.

Le poste « ECS » n'a pas toujours été renseigné pour les bureaux. Toutefois, ce poste est généralement très faible pour ce type de fonction.

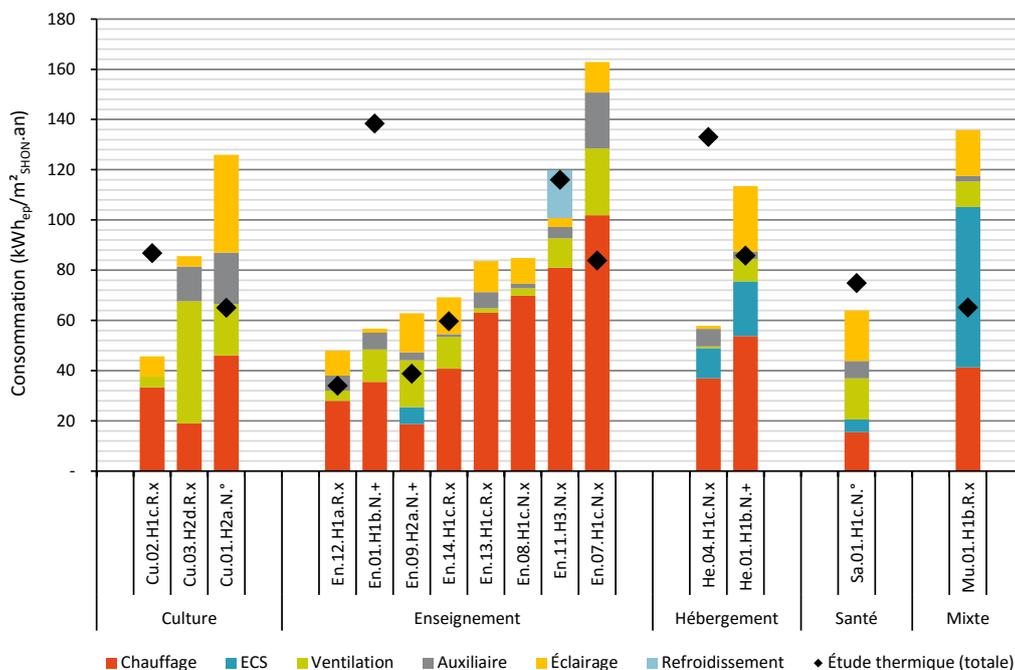
Illustration 30 – Répartition en pourcentage de la consommation mesurée des postes⁸ réglementés



Tertiaire autre

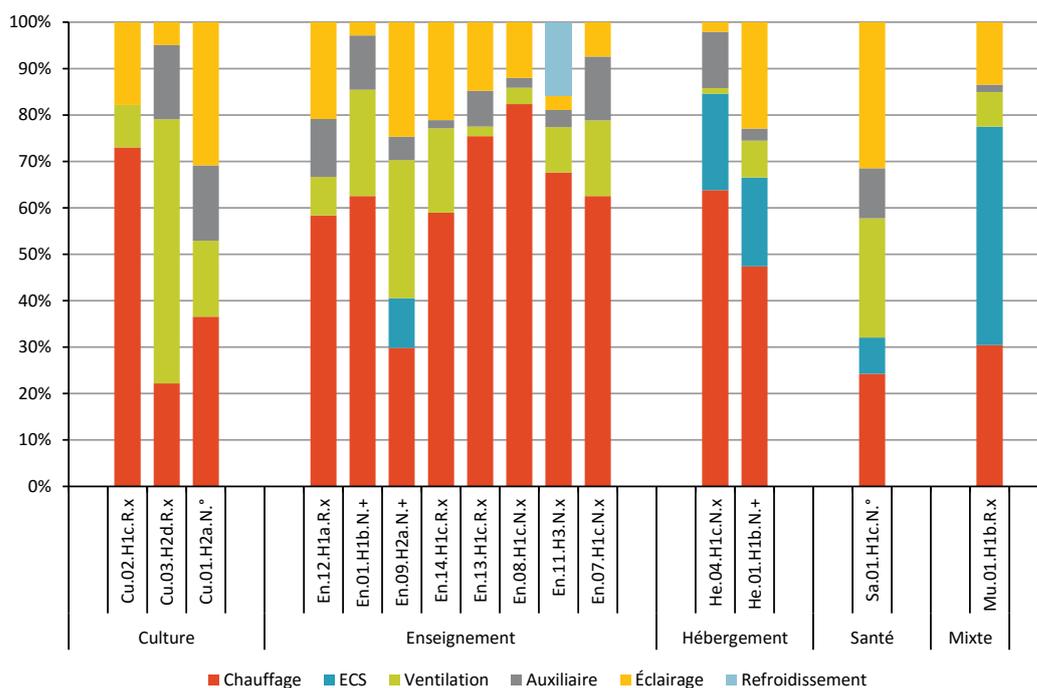
Pour les écoles, la consommation des cinq postes réglementés varie généralement de 20 à 100 kWh_{ep}/m².an.

Illustration 31 – Répartition en valeurs de la consommation mesurée des postes réglementés⁹ et valeur de l'étude thermique réglementaire



8. Le poste « ECS » n'a pas toujours été renseigné pour les bureaux. Toutefois, ce poste est généralement très faible pour ce type de fonction.
9. Le poste « chauffage » inclut parfois les auxiliaires.

Illustration 32 – Répartition en pourcentage de la consommation mesurée des postes réglementés



Nous pourrions observer au travers des illustrations en valeur que les **consommations mesurées des postes réglementés** sont généralement supérieures à leur **valeur donnée par l'étude thermique réglementaire**, excepté en habitat individuel où, dans la moitié des cas, l'écart reste faible. Cependant, la **comparaison de ces deux seules valeurs n'a pas véritablement de sens** et ne permet de tirer aucune conclusion: celles-ci dépendent de paramètres qui peuvent être très largement divergents, telles la météo et l'occupation; toute analyse en la matière nécessite de prendre en compte ces paramètres. Une comparaison de la consommation mesurée avec l'objectif de conception lors de l'étude thermique réglementaire est effectuée au § 1.5.

Et les paramètres explicatifs des consommations sont étudiés un à un dans les chapitres suivants.

À retenir

La consommation des cinq postes réglementés varie généralement:

- de 40 à 50 kWh_{ep}/m².an pour les maisons individuelles en diffus;
- de 40 à 100 kWh_{ep}/m².an pour les maisons individuelles en groupé;
- de 50 à 80 kWh_{ep}/m².an pour les bureaux;
- autour de 80 kWh_{ep}/m².an pour les écoles;
- et de 80 à 140 kWh_{ep}/m².an pour l'habitat collectif.

Concernant les bâtiments de bureaux et d'habitation, leur nombre est suffisant pour dégager quelques enseignements par poste.

Le chauffage reste le poste réglementé le plus important

La consommation de chauffage mesurée des **bureaux** de l'échantillon est généralement **en dessous de 40 kWh_{ep}/m².an**, et peut descendre à 10 kWh_{ep}/m².an pour les bâtiments les plus performants.

La consommation de chauffage mesurée en **habitat collectif** se situe **au-dessus de 40 kWh_{ep}/m².an**. Celle de l'habitat individuel approche souvent 20 kWh_{ep}/m².an en secteur diffus, mais peut être aussi plus élevée.

Le chauffage reste généralement le premier poste de consommation réglementé.

La part de l'eau chaude sanitaire devient importante en habitat

Dans les bâtiments d'**habitation**, maintenant fortement isolés thermiquement, la diminution de la consommation de chauffage met en évidence la **part importante de l'eau chaude sanitaire**, souvent à hauteur d'un tiers et à plus de **20 kWh_{ep}/m².an** en habitat collectif.

Dans les bâtiments de **bureaux**, la **consommation énergétique d'eau chaude sanitaire (ECS) est généralement très faible**, de 1 à 12 kWh_{ep}/m².an au maximum. Ce poste n'est d'ailleurs pas pris en compte par la réglementation thermique 2005 (Tableau du § A.2.4; contrairement à la RT 2012); il en est de même pour les autres tertiaires, d'enseignement - crèches comprises - et de spectacle.

Un écart de consommation de un à quatre peut simplement s'expliquer par la durée de fonctionnement.

Pour un bâtiment de bureau en Rhône-Alpes :

« La consommation d'ECS quatre fois plus élevée la première année s'explique par la mise en place d'une programmation horaire entre les deux années. »

Il est à noter enfin que les consommations énergétiques d'ECS sont atténuées du fait que la majorité des opérations de l'échantillon sont équipées de capteurs solaires.

Le poste « ventilation » voit sa part augmenter

Pour plusieurs opérations, notamment des bâtiments de bureaux et d'habitation collective, la consommation mesurée de ventilation est plus importante que celle observée sur les bâtiments RT 2005 courants. En effet, pour la plupart de ces opérations à l'époque, une ventilation double flux a été mise en place. La pose de ce type de système entraîne une augmentation de la consommation de ventilation, mais permet aussi de réduire les besoins de chauffage.

Le poste « éclairage » est très variable

La consommation d'éclairage constitue le troisième poste en tertiaire de bureaux, avec une consommation généralement de 10 kWh_{ep}/m².an.

Elle est extrêmement variable en habitat.

Malgré la généralisation des lampes basse consommation, la durée de fonctionnement reste le facteur prédominant.

À retenir

La répartition des postes de consommation réglementés des bâtiments à basse consommation est très différente de celle des bâtiments RT 2005 courants, même si le chauffage reste le premier poste consommateur parmi les postes réglementés.

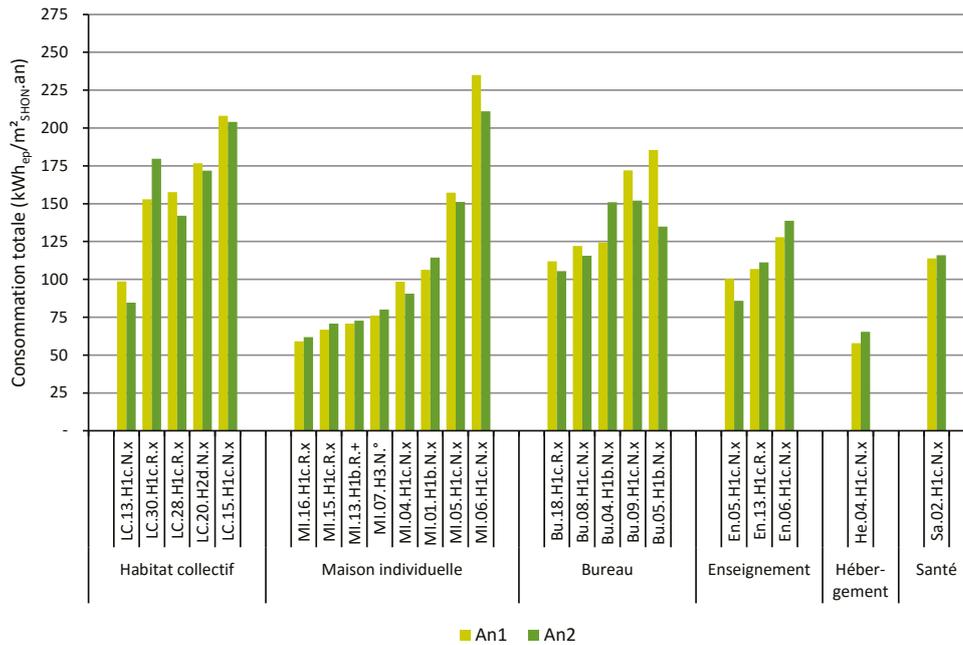
Les nouveaux enjeux concernent :

- le poste ECS en d'habitat;
- le poste ventilation en tertiaire de bureaux;
- et les durées de fonctionnement de l'éclairage.

1.3 Évolution des consommations dans les premières années de suivi

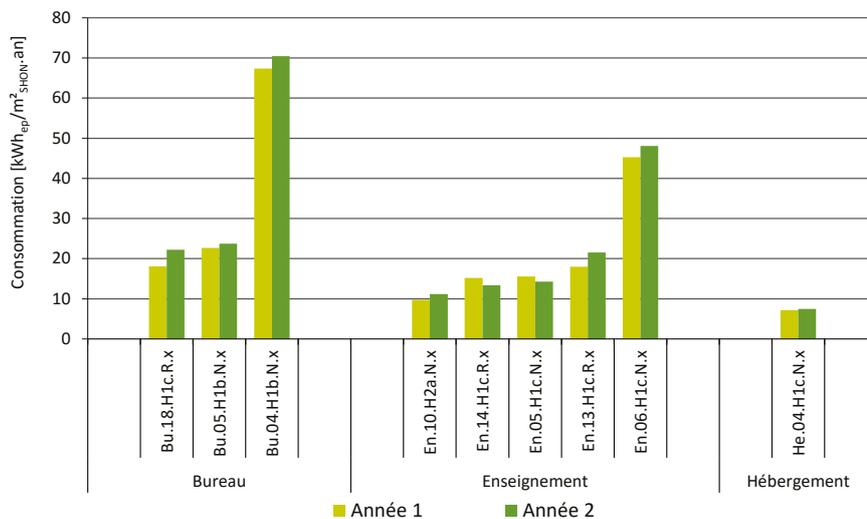
L'illustration 33 indique la consommation totale pour 24 opérations de l'échantillon, mesurée durant les deux premières années de suivi. Celle-ci n'évolue pas particulièrement dans un sens ou dans l'autre.

Illustration 33 – Consommation totale mesurée des première et deuxième années de suivi



Cette stabilité se retrouve pour la part des postes non réglementés en tertiaire, comme le montre l'illustration 34.

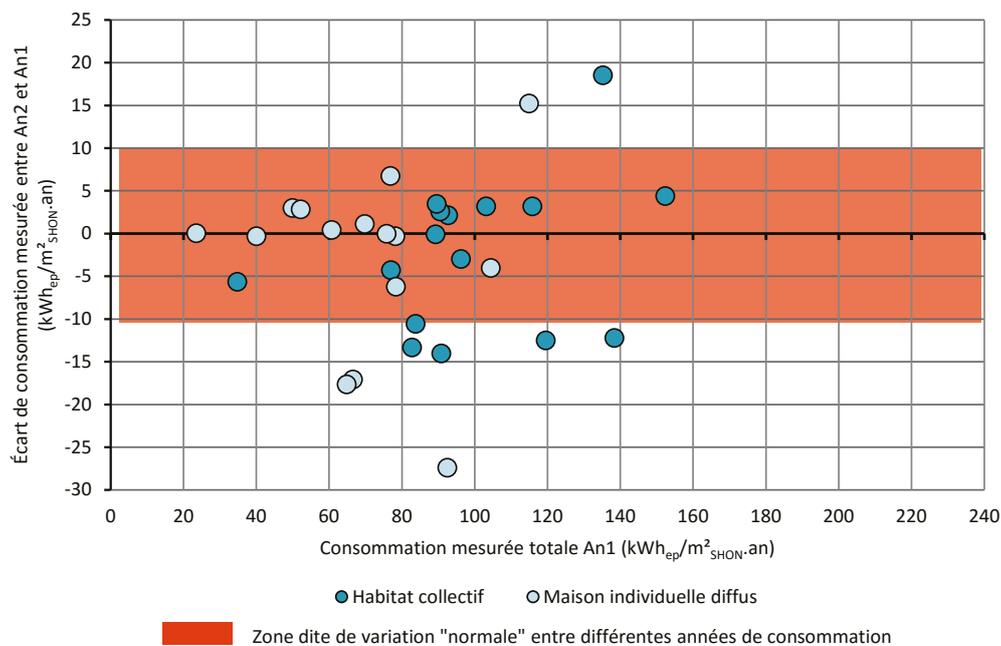
Illustration 34 – Variation de la consommation des postes réglementés en tertiaire entre les deux années de suivi



En revanche, **pour la part des postes réglementés**, une baisse se dégage au-delà de l'influence des conditions météorologiques, comme le montrent les illustrations 35 pour l'habitat et 36 pour le tertiaire.

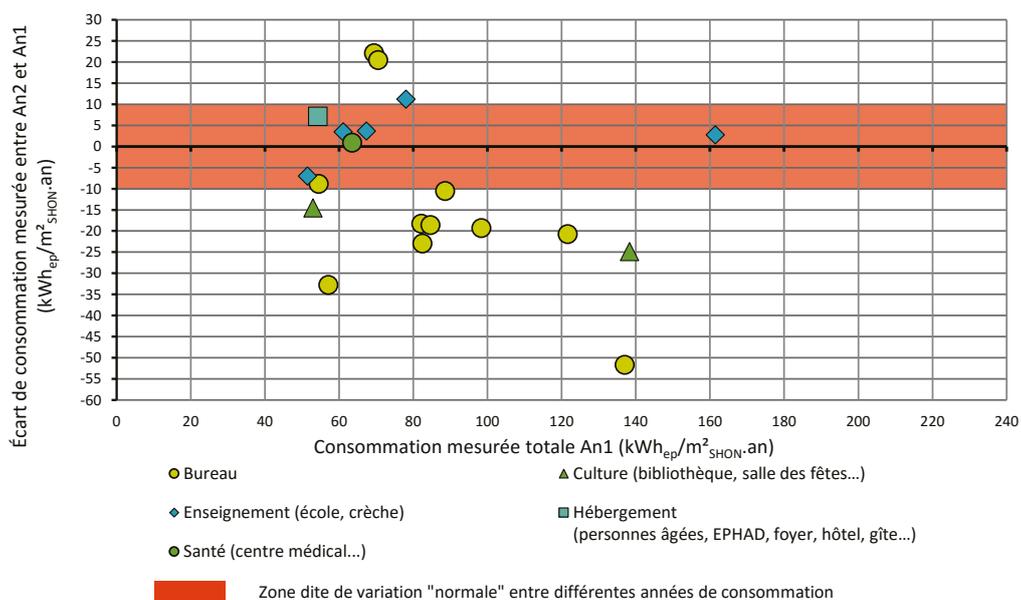
En effet, en considérant que l'impact maximal des conditions météorologiques est de l'ordre de $\pm 10 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2\cdot\text{an}$ sur l'échantillon (comme déduit du graphique 45 au § 2.3¹⁰), la consommation des postes réglementés baisse au-delà de cet effet potentiel pour une grande majorité des opérations.

Illustration 35 – Variation de la consommation des postes réglementés en habitat entre les deux années de suivi



Pour les bâtiments tertiaires, cette baisse est même plus prononcée et de plus forte ampleur (Illustration 36).

Illustration 36 – Variation de la consommation des postes réglementés en tertiaire entre les deux années de suivi



10. En remplaçant le fichier météo de référence de la méthode de calcul Th-CE 2005 par les conditions météorologiques mesurées.

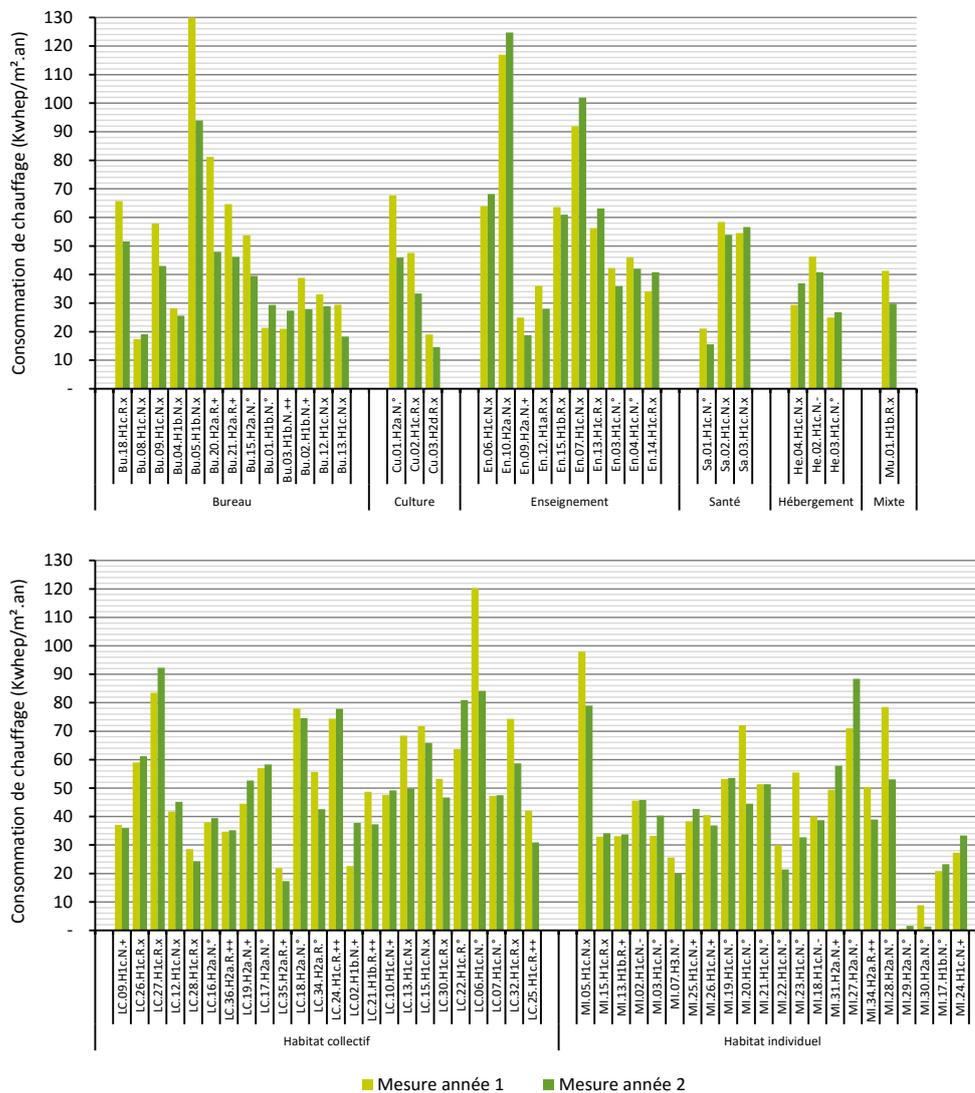
Cette tendance à la baisse des consommations peut s'expliquer par l'amélioration des réglages des équipements techniques, le séchage du bâtiment, voire les recommandations données en fin de première année de mesures, qui peuvent avoir été suivies par les exploitants des bâtiments évalués. Il n'est pas rare, en effet, que les équipements livrés ne soient pas ajustés aux besoins réels du bâtiment dès la première année, voire aient conservé leurs réglages d'usine.

Pour une rénovation de bureaux en Rhône-Alpes :

« Après ajustement à l'utilisation, la programmation horaire des équipements a permis de faire baisser d'environ 25 % les consommations réglementées. »

Pour la consommation mesurée de chauffage, poste réglementé le plus important en volume (§ 1.2.2), nous retrouvons la même proportion d'opérations à la baisse.

Illustration 37 – Évolution de la consommation mesurée de chauffage entre la première et la deuxième année de suivi



À retenir

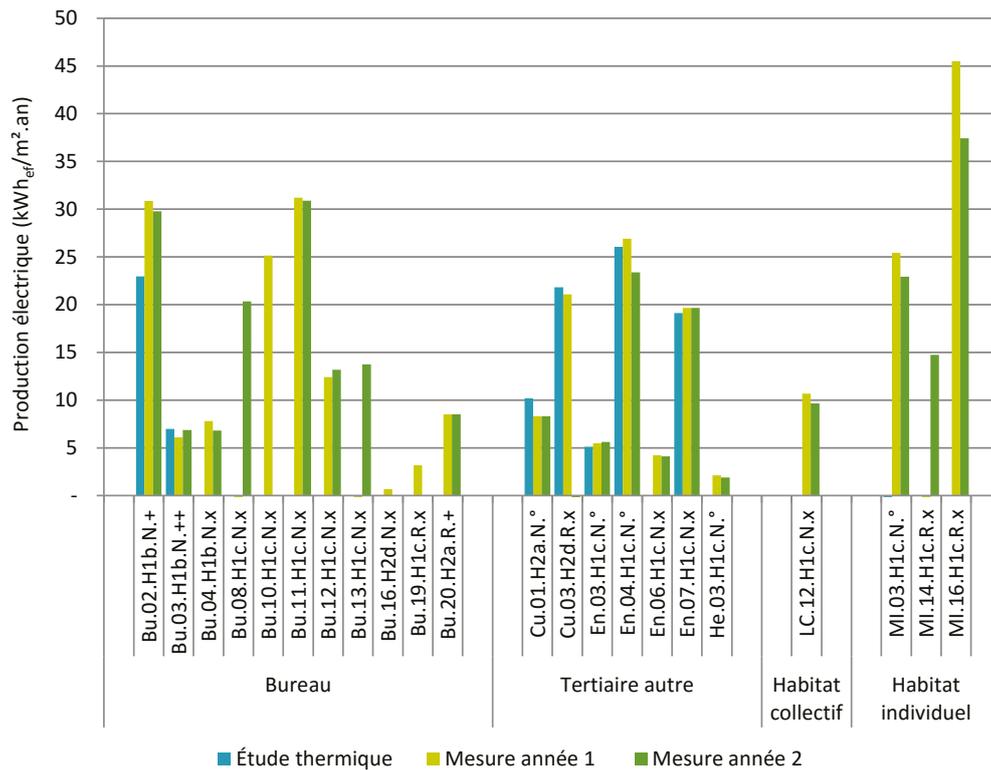
Une tendance à la baisse de la consommation est observée entre la première et la deuxième année de suivi pour la part réglementée de la consommation, souvent supérieure à 10 kWh_{ep}/m².an au-delà de toute influence des conditions météorologiques.

1.4 Production d'électricité photovoltaïque

Dans l'échantillon, près d'une opération sur quatre est dotée de capteurs photovoltaïques, essentiellement en bâtiments tertiaires.

L'illustration 38 donne les mesures de production électrique pour 22 bâtiments. .

Illustration 38 – Production mesurée d'électricité photovoltaïque et valeur de l'étude thermique (en énergie finale)



La taille des installations est très variable, de 16 m² pour la MI14 à 1 600 m² pour le Bu13.

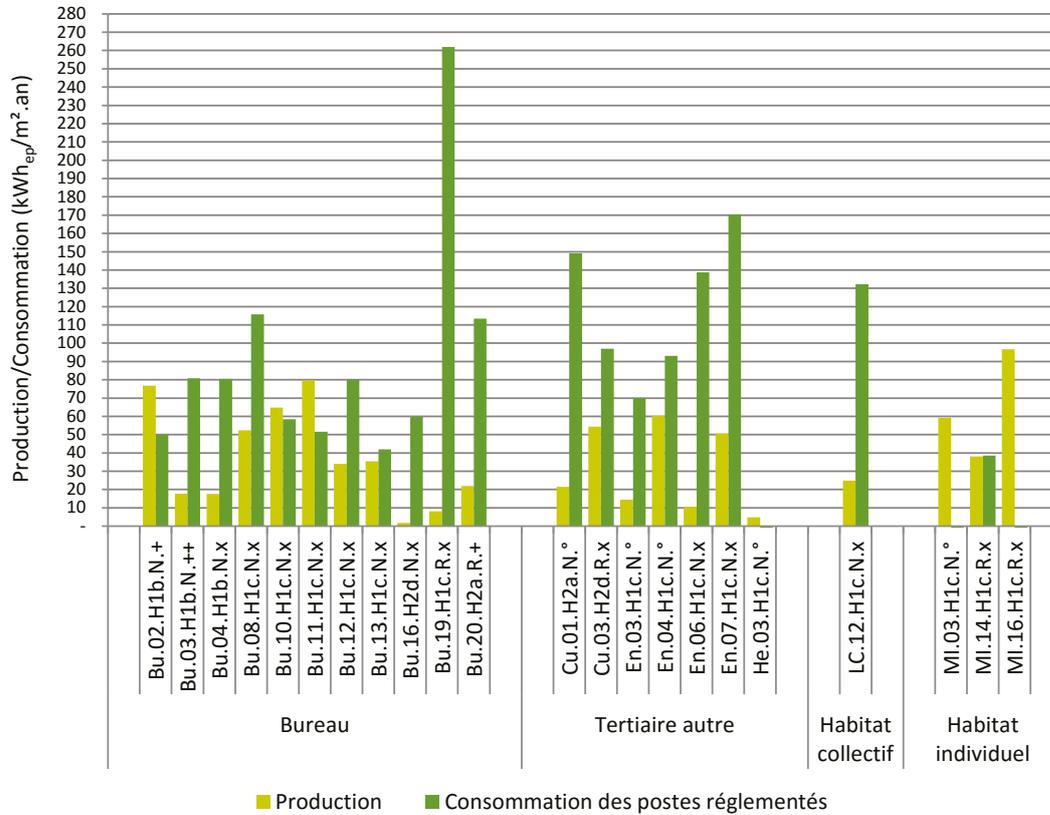
Celles des Bu16 et Bu19 sont limitées à des auvents de protection solaire des fenêtres en façade sud, de 20 et 45 m² ; avec des surfaces SHON du bâtiment élevées, respectivement de 3 500 et 2 000 m², les ratios de production sont alors très faibles, de 1 et 3 kWh_{ef}/m².an.

Plus généralement, la production se situe entre 4 et 30 kWh_{ef}/m².an en énergie finale.

Les productions mesurées sont plutôt stables entre la première et la deuxième année, et généralement au même niveau que la valeur de l'étude thermique réglementaire, montrant ainsi une influence relativement faible des conditions météorologiques.

La production est généralement loin de couvrir la consommation des postes réglementés comme le montre l'illustration 39 (comparaison en énergie primaire), même si elle peut dépasser celle-ci dans certains cas.

Illustration 39 – Comparaison des mesures de production d'électricité photovoltaïque et de consommation des postes réglementés



À retenir

Les installations photovoltaïques des bâtiments tertiaires de l'échantillon produisent généralement de 20 à 80 kWh_{ep}/m².an (8 à 30 en énergie électrique finale).

Les conditions météorologiques n'ont quasiment pas d'influence sur les productions annuelles.

1.5 Performances attendues et mesurées

La question qui vient à l'esprit au vu des résultats des mesures de consommation est souvent : « l'objectif de conception a-t-il été atteint ? ». Cependant, répondre à cette question n'est pas simple. La réponse ne peut déjà pas se trouver dans la comparaison directe de la consommation mesurée avec la consommation donnée par l'étude thermique réglementaire établie à la conception. En effet, les paramètres extrinsèques au bâtiment, pris en compte au travers d'hypothèses figées dans le calcul réglementaire, peuvent avoir un impact très important sur la consommation : les conditions météorologiques peuvent en effet faire varier la consommation donnée par le calcul de l'étude thermique jusqu'à 15 kWh_{ep}/m².an et les conditions d'occupation (température de consigne, apports internes...) également.

Le recalcul des consommations de l'étude thermique réglementaire dans les conditions météorologiques et d'occupation de l'année des mesures permet de constituer un indicateur de consommation théorique qui rend compte des performances d'ensemble attendues à la conception, dans ces mêmes conditions et pour les postes réglementés uniquement (Méthode en annexe A.4). La consommation mesurée peut alors être comparée à cet indicateur que nous appellerons « consommation attendue ».

Cette démarche développée dans les suivis-évaluations du Cerema est rendue possible, notamment, par :

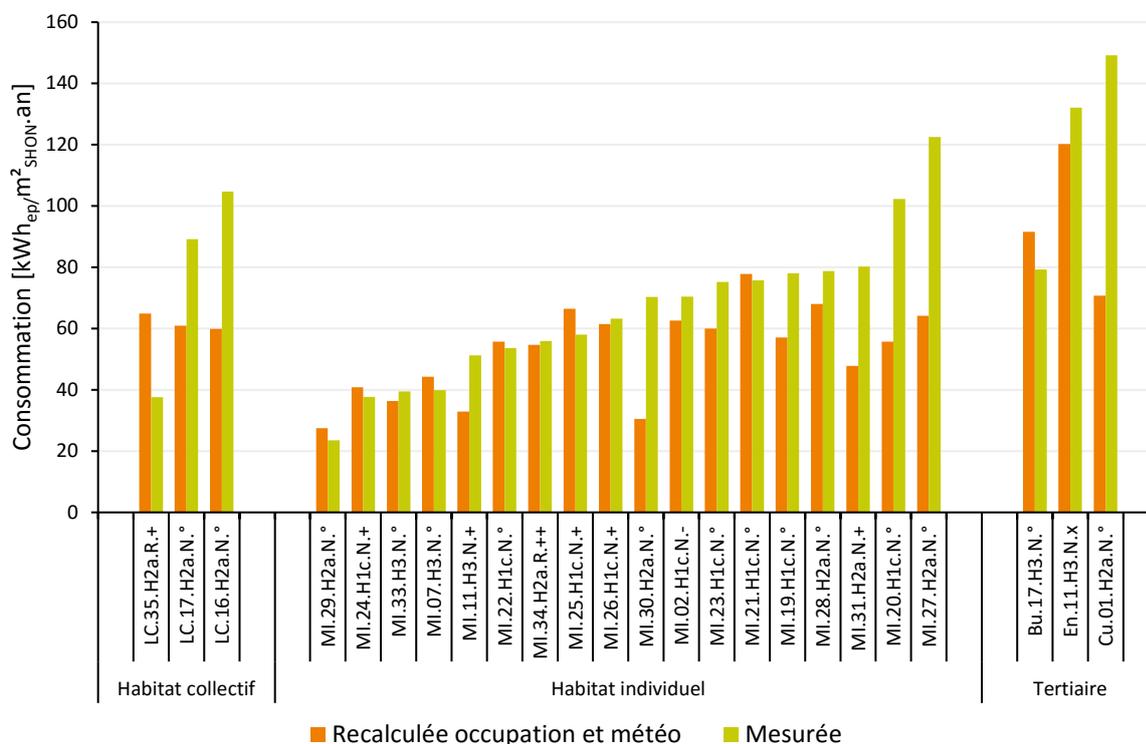
- l'utilisation du moteur de calcul de la RT2005 en mode ouvert à certaines données conventionnelles (météo, apports internes, scénarios d'occupation...);
- la caractérisation de la température intérieure de consigne basée sur l'analyse statistique des températures intérieures pendant l'occupation et la fourniture thermique, chaude ou froide;
- l'évaluation du taux moyen d'apports internes en occupation et du scénario d'occupation hebdomadaire.



Il faut noter que cette méthode d'analyse comporte bien évidemment des limites, certains paramètres ne pouvant être évalués avec précision (vent sur le site, scénario d'ouverture des fenêtres, scénario de fermeture des occultations...) ou ne pouvant pas être modifiés dans le moteur de calcul (scénario des réduits de chauffage, dynamique de gestion des ouvertures selon les conditions météorologiques...).

Dans l'échantillon de capitalisation 2016, le recalcul des consommations a pu être réalisé sur 24 opérations, laissant apparaître que la consommation mesurée est dans un cas sur deux supérieure de plus de 10 kWh_{ep}/m².an à la consommation attendue. Et pour le quart des opérations, l'écart est supérieur à 35 kWh_{ep}/m².an (6/24) (Illustration 40).

Illustration 40 – Consommation attendue et consommation mesurée des postes réglementés



Pour l’habitat individuel, les écarts sont souvent faibles (moins de 10 kWh_{ep}/m²) et seuls 4 bâtiments (MI.30.H2a.N.° ; MI.31.H2a.N.+ ; MI.20.H1c.N.° et MI.27.H2a.N.°) présentent des consommations mesurées sensiblement supérieures aux consommations attendues.

Les consommations mesurées sont bien inférieures aux consommations observées pour les logements RT 2005 en 2011 (de l’ordre de 120 kWh_{ep}/m².an en chauffage au gaz et 170 kWh_{ep}/m².an en chauffage électrique).

Les consommations mesurées sont en revanche le plus souvent supérieures aux consommations attendues dans les usages tertiaires et l’habitat collectif.



Une consommation totale mesurée proche de la valeur attendue peut résulter d’une répartition différente des cinq postes RT (chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, éclairage et auxiliaires). Il convient ainsi d’analyser chaque poste.

1.6 Explication des écarts constatés

Afin d'expliquer les écarts entre consommations attendues et consommations mesurées, la démarche adoptée dans les suivis-évaluations du Cerema cherche à caractériser in situ, par des méthodes d'évaluation basées sur des mesures, les performances intrinsèques des bâtiments sur tout ou partie des éléments suivants :

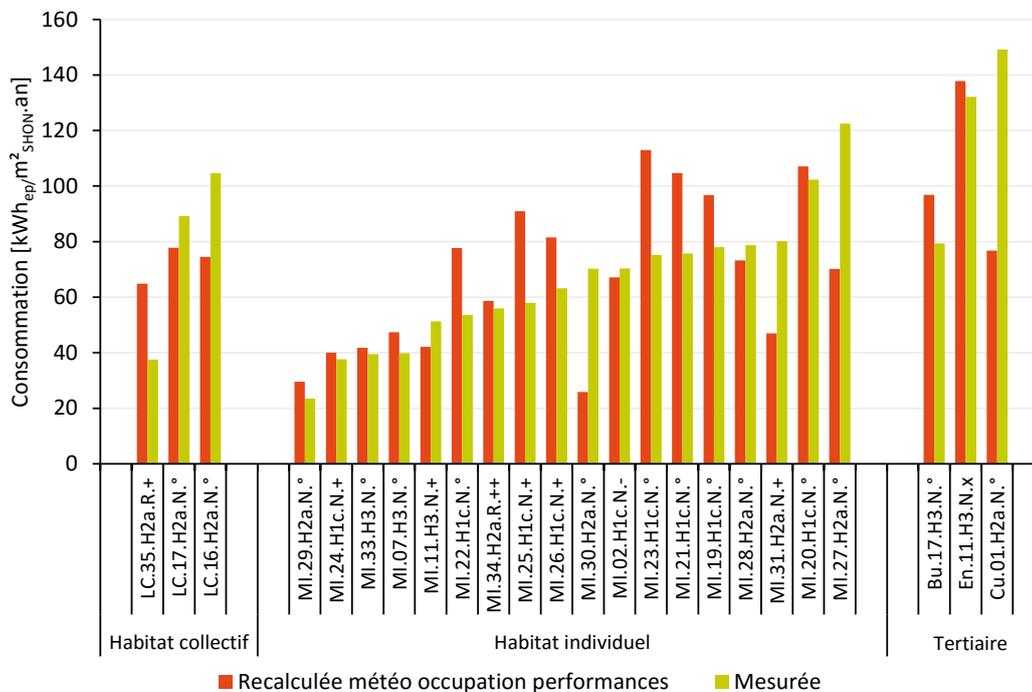
- étanchéité à l'air de l'enveloppe ;
- coefficient de déperdition thermique du bâtiment U_{bat} par la méthode du bilan thermique équilibré sur les semaines les plus froides (Annexe A.3) ;
- efficacité des échangeurs double flux ;
- rendements à charge partielle.

Un nouveau calcul est effectué à l'aide du moteur de calcul de la RT 2005 en prenant en compte ces différentes performances intrinsèques évaluées, en sus des paramètres extrinsèques (météo et occupation).



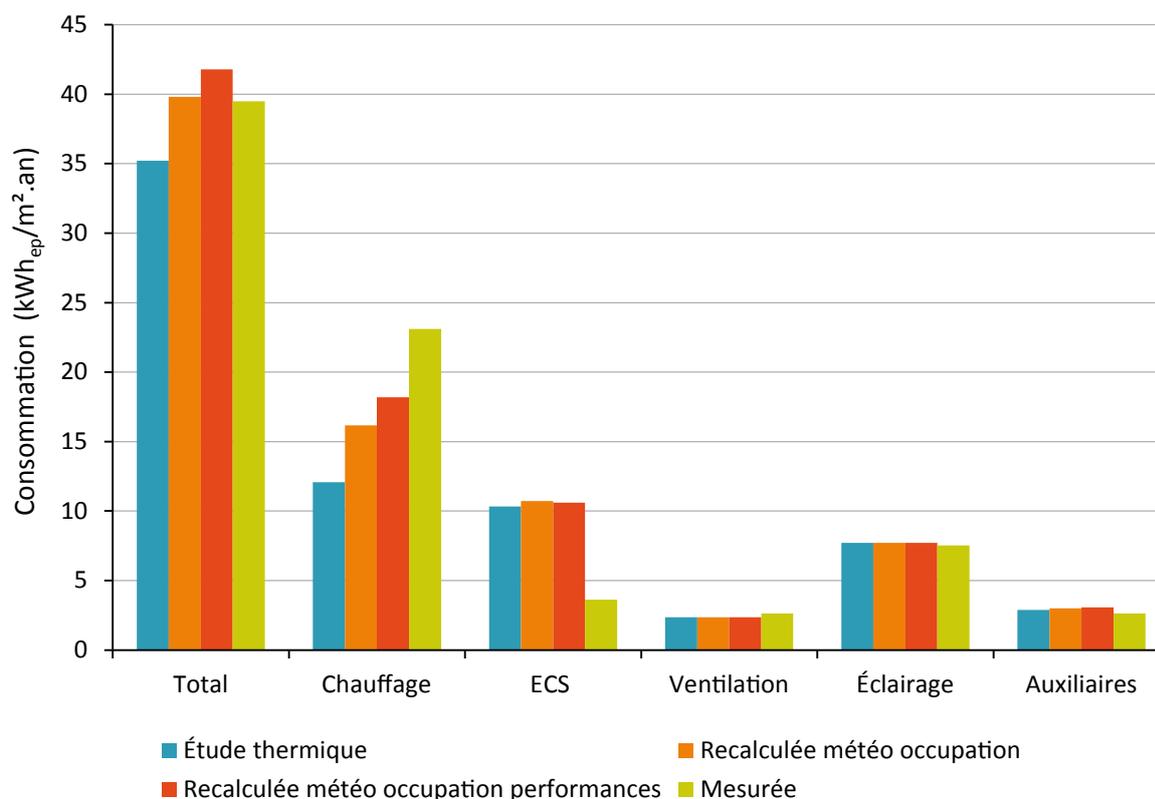
Cette démarche est limitée, car l'ensemble des performances du bâtiment ne peuvent pas être modélisées dans le modèle numérique horaire (phénomènes transitoires, système de chauffage complexe, prise en compte des réglages...). De plus, certaines performances intrinsèques n'ont pas été évaluées (débit d'aération en mode hygro). Par ailleurs, au-delà des difficultés rencontrées pour la mise en place et le fonctionnement correct de la métrologie, une partie des écarts résiduels entre la consommation recalculée et la consommation mesurée est aussi imputable aux incertitudes de mesure et de recueil d'information auprès des occupants.

Illustration 41 - Consommation attendue recalculée avec tous les paramètres de performance constatés et consommation mesurée (postes réglementés)



Ces écarts peuvent être analysés plus finement par poste et par opération, comme le montre l'exemple suivant sur une maison individuelle en Languedoc-Roussillon.

Illustration 42 – Bilan des consommations sur une maison individuelle



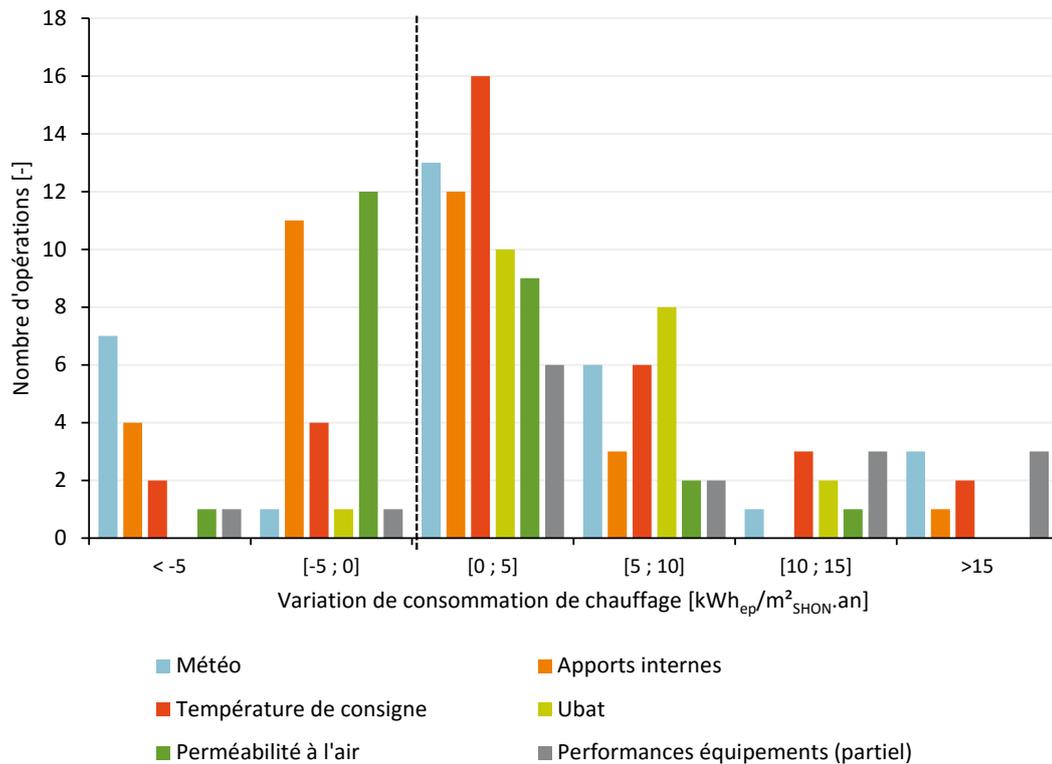
À la lumière de ces résultats et des analyses conduites dans les chapitres suivants, il apparaît, à ce stade du travail de capitalisation, que les écarts entre performances attendues et mesurées sont dus à de multiples facteurs, dont notamment la performance de l’enveloppe, le dimensionnement des générateurs de chaleur, la gestion des apports solaires et le pilotage des installations. Ces facteurs sont variables d’une opération à l’autre. On peut toutefois analyser sur notre échantillon les facteurs les plus récurrents, ainsi que ceux ayant un impact important en termes de recalcul sur la consommation de chauffage.

Ainsi dans l’illustration 43, nous avons comparé pour chacun des paramètres — extrinsèques ou intrinsèques au bâtiment — les impacts sur la consommation de chauffage recalculée des différentes opérations. L’objectif est de répondre à la question : « Sur notre échantillon, quelles sont les causes d’écarts entre la consommation mesurée et la consommation RT les plus fréquentes ? ». Cela dépend non seulement de la fréquence de l’écart, mais aussi de son importance sur le recalcul.

Ainsi dans l’illustration 43, les impacts sont classés selon leur importance et le nombre d’opérations concernées. Les impacts négatifs conduisent à une diminution de la consommation de chauffage, les impacts positifs à une augmentation. Le nombre d’opérations concernées peut varier d’un paramètre à l’autre selon que nous disposons ou non du recalcul.

On observe que la température de consigne d’une part et la transmission thermique de l’enveloppe ($U_{bât}$) d’autre part sont une des causes d’écart importantes pour la plupart des opérations et conduisent à une augmentation de consommation de chauffage.

Illustration 43 – Impact des différents paramètres sur la consommation de chauffage recalculée pour chaque opération



La température de consigne concerne 33 opérations et sur plus d'un tiers des opérations, l'impact est supérieur à 5 kWh_{ep}/m².an (en valeur absolue). Dans 90 % des cas, elle augmente la consommation de chauffage.

Pour le U_{bât}, moins d'opérations sont concernées (21), mais les impacts sont plus importants, avec la moitié supérieure à 5 kWh_{ep}/m².an (en valeur absolue). Tous les impacts (sauf un) conduisent à une augmentation des consommations de chauffage (§ 4.2).

Les conditions météorologiques de suivi concernent aussi 33 opérations, et pour plus de la moitié l'impact est supérieur à 5 kWh_{ep}/m².an (en valeur absolue). Toutefois, contrairement au cas de la température de consigne, les impacts sont indifféremment positifs ou négatifs sur la consommation de chauffage, ce qui semble tout à fait logique pour un paramètre extrinsèque stochastique (§ 2.3).

Les apports internes concernent 31 opérations, mais leurs impacts sont moins importants avec seulement un quart d'impacts supérieurs à 5 kWh_{ep}/m².an (en valeur absolue). Comme pour la météo, les impacts sont indifféremment positifs ou négatifs sur la consommation de chauffage, ce qui semble tout à fait logique pour un paramètre extrinsèque au bâtiment stochastique (§ 3.3.4).

Pour la perméabilité à l'air, 25 opérations sont concernées, mais 80 % des impacts sont inférieurs à 5 kWh_{ep}/m².an (en valeur absolue). Les effets ont tendance à baisser la consommation de chauffage. Ceci est souvent dû au fait que dans le calcul, une valeur par défaut (pénalisante) a été prise en compte (§ 4.3.3).

Enfin, le rendement de chauffage ne concerne que 16 opérations : ce faible nombre d'opérations n'est pas dû au fait que ce n'est pas une source d'écart fréquente sur la consommation de chauffage, mais à la difficulté d'évaluer le rendement effectif « nominal », donnée d'entrée du calcul. Sur ce faible échantillon (donc non représentatif en termes de classement des niveaux d'impact), un peu plus de la moitié montrent un impact supérieur à 5 kWh_{ep}/m².an (en valeur absolue), avec une tendance plutôt à augmenter la consommation de chauffage (§ 5.1.2).

Les méthodes de suivi-évaluation nous montrent aussi l'intérêt du comptage thermique pour le suivi énergétique

des opérations. Ce comptage permet en effet de séparer ce qui relève de l'efficacité des systèmes incombant à l'exploitant et ce qui relève de la gestion thermique de la demande, qui est du ressort des occupants dans leur comportement éco-responsable.



La performance d'ensemble du bâtiment a été également analysée du point de vue de l'utilisateur qui s'attache au service rendu par les équipements (facilité d'appropriation des systèmes et fonctionnement effectif) et à l'atteinte de son confort. Cette évaluation correspond à une des thématiques de l'analyse présentées dans les chapitres 6 et 7. Sur le panel propre à cette étude plus sociologique, il a ainsi pu être mis en évidence que des difficultés d'apprentissage et d'appropriation des systèmes par les occupants en contexte résidentiel existent de façon relativement récurrente. Plus de détails figurent dans les parties correspondantes.



Conditions météorologiques

L'essentiel

Les conditions météorologiques étant un facteur important de la consommation de chauffage, leur mesure est indispensable pour évaluer leur impact d'une année à l'autre. Celle-ci permet également d'expliquer l'écart avec la valeur calculée de l'étude thermique réglementaire, laquelle est basée sur les données météorologiques trentenaires de la zone climatique de référence concernée, parmi les huit qui couvrent la France métropolitaine.

Auparavant, pour connaître l'impact des conditions météorologiques réelles sur la consommation de chauffage, il suffisait d'appliquer une relation de proportionnalité avec la température extérieure hivernale, mesurée par rapport à une température de non-chauffage¹¹ de 18 °C. Mais avec les bâtiments à basse consommation, il apparaît que ce n'est plus le cas. La forte isolation thermique abaisse significativement la température de non-chauffage. Un autre paramètre, le rayonnement solaire, joue en particulier un rôle plus important, les déperditions de chaleur étant maintenant moins importantes.

En prenant en compte les mesures horaires de température, d'ensoleillement, d'humidité et de vitesse du vent, quand il n'y a pas de difficultés d'instrumentation au niveau des stations météo, l'utilisation du moteur dynamique de la réglementation thermique 2005 nous donne également l'ampleur de l'impact des conditions météorologiques.

11. La température de non-chauffage est la température extérieure à partir de laquelle on considère nécessaire de chauffer le bâtiment.

2.1 Niveaux de température extérieure hivernale

Pour comparer les températures des années de suivi aux températures des stations de référence de la réglementation thermique 2005, nous nous basons sur la comparaison des « degrés jours unifiés » DJU (méthode météo)¹².

Il est à noter que sur notre échantillon, selon les opérations, quatre saisons de chauffe différentes sont concernées, de mi-2010 à mi-2015.

Les trois grandes familles de climat sont présentes (océanique, continental et méditerranéen). Cinq zones climatiques au sens de la RT 2005 sont représentées (H1b, H1c, H2a, H3c et H3d). Les zones H1 et H2 sont bien représentées dans l'échantillon.

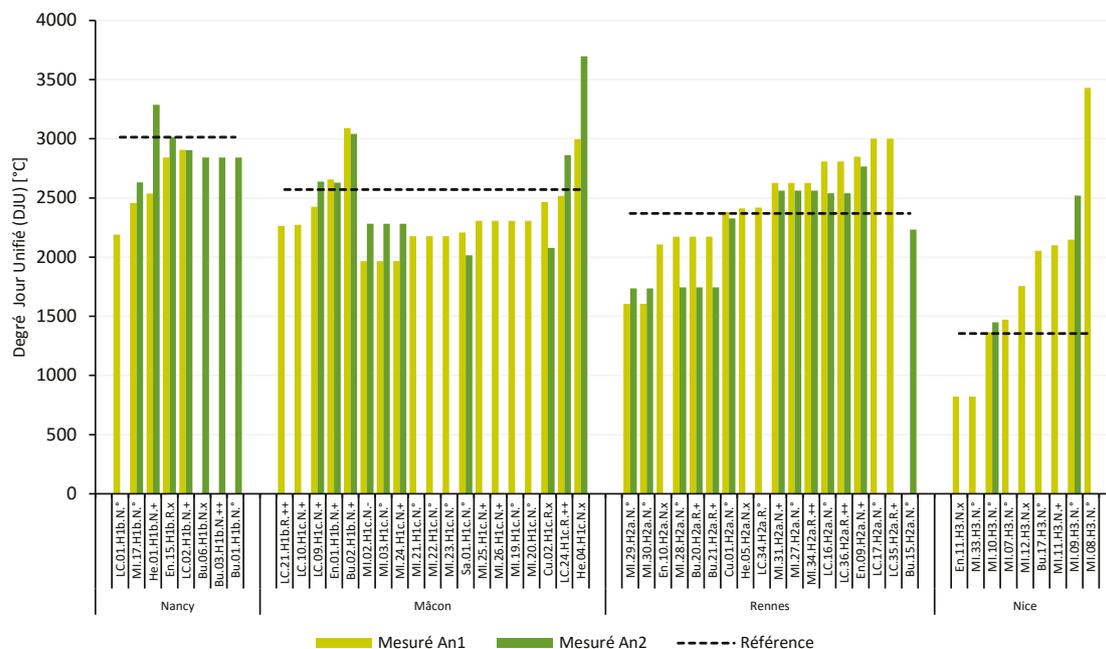
Nous observons des différences plus ou moins prononcées selon la zone climatique dans laquelle se situent les opérations.

Dans la zone climatique H1, la météo des années de suivi de l'échantillon a été en moyenne plus clémente que la météo de référence de la réglementation thermique 2005, si l'on compare leurs DJU (Illustration 44) : 2 775 °C DJU en moyenne en zone H1a contre 3 013 °C de DJU trentenaire pour la station de référence Nancy, et 2 426 °C en moyenne en zone H1b contre 2 572 °C pour Mâcon.

Pour les opérations situées dans la zone H2, globalement la météo a été très proche du niveau de la station de référence de la RT 2005 : une moyenne de 2 340 °C de DJU à comparer à 2 368 °C de DJU trentenaire pour la station de Rennes, avec toutefois des écarts types plus importants par rapport à cette moyenne que ceux observés en zone H1.

Quant à la zone H3 (climat méditerranéen), nous y observons un écart important par rapport au DJU de la station de référence, et de fortes variations pouvant être attribuées à des gradients d'altitude importants entre les différentes opérations, à un éloignement plus grand à la station de référence, et à la présence de nombreux microclimats : une moyenne de 1 812 °C de DJU à comparer à 1 354 °C de DJU trentenaire pour la station de Nice, avec un écart type plus important encore qu'en zone H2.

Illustration 44 – DJU mesurés et DJU trentenaires des stations de référence



N.B.: ces observations ne sont pas valables pour la RT2012, car les fichiers météo des stations de référence y ont été actualisés.

12. Les degrés-jours (DJ) base 18 sont les moyennes journalières du maximum et du minimum des températures journalières du lieu, soustraites à la base de 18 °C : $18 - (T_{max} + T_{min}) / 2$, pour chaque jour. Les degrés-jours unifiés, ou DJU, sont la somme des DJ sur la période de chauffage (par convention du 1^{er} octobre au 20 mai).

2.2 Température extérieure de non-chauffage

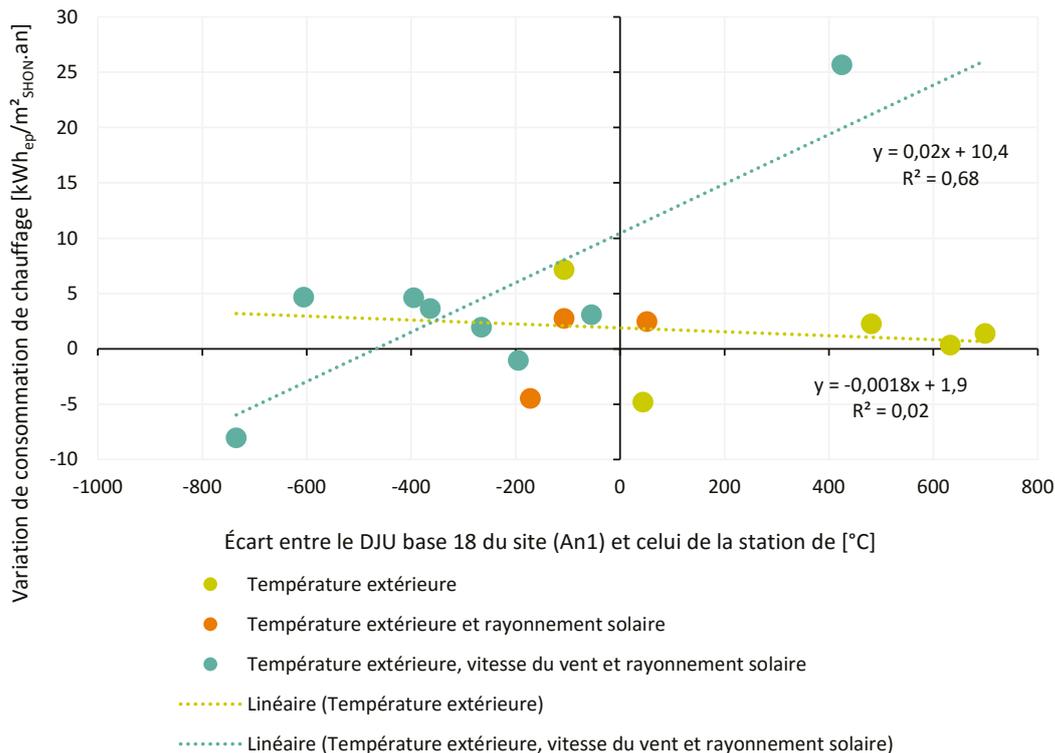
Le niveau des degrés-jours unifiés (DJU) qui pouvait caractériser auparavant la rigueur climatique sur une saison de chauffe ne peut plus être basé sur une température de non-chauffage de 18 °C. Des enveloppes très isolées, associées à des apports solaires et internes relativement plus importants, conduisent à abaisser significativement ce seuil sur certaines opérations, de 18 °C à 15 °C, voire 12 °C dans certains cas particuliers. Le graphique ci-dessous illustre la non-linéarité entre la variation des DJU (base 18) et les variations de consommations recalculées attribuables à la météo.

L'illustration 45 montre, pour chaque opération, l'impact sur le calcul de consommation de chauffage lorsque l'on prend en compte dans le calcul la météo du site au lieu de la météo de référence.

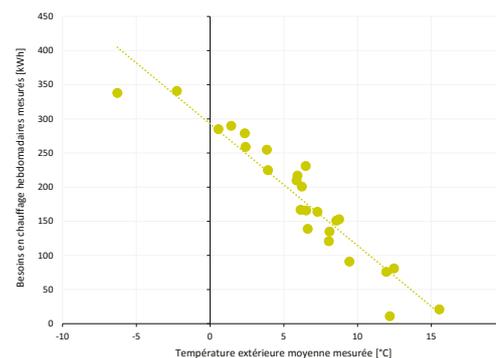
En ordonnée se trouve ainsi la variation de chauffage entre le calcul avec la météo de la station de référence et le calcul avec la météo du site: une variation négative correspond à une baisse de consommation.

Dans certains cas, le recalcul avec la météo du site, prend en compte, outre la température extérieure, le rayonnement solaire mesuré et/ou la vitesse du vent, selon les mesures effectuées sur site. En abscisse n'a été reportée toutefois que la différence entre les DJU mesurés sur le site et les DJU de la station de référence: la variation est donc négative lorsque le climat a été plus clément sur site qu'en théorie.

Illustration 45 - Évolution de la consommation de chauffage après recalculs
avec les différents paramètres météorologiques mesurés, au regard de la variation de DJU



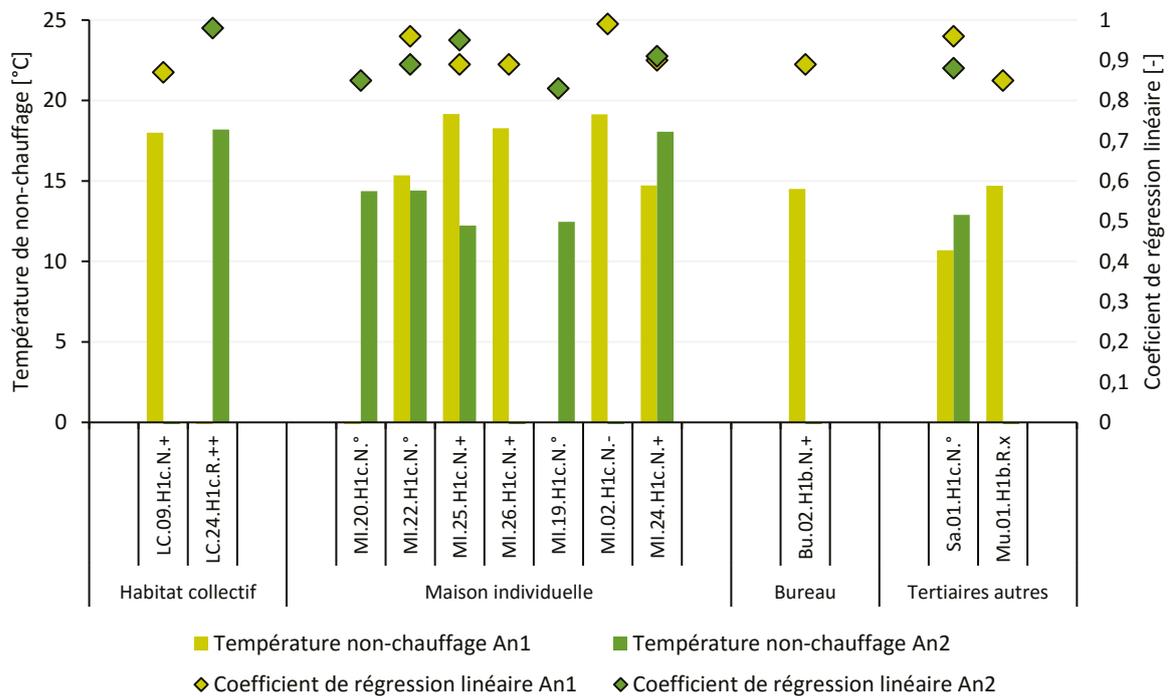
Les besoins de chauffage mesurés hebdomadaires (kWh énergie finale), lorsque nous disposons de cette donnée, ont été analysés au regard de la température extérieure moyenne hebdomadaire. Par régression linéaire, on obtient une température expérimentale de non-chauffage. Par exemple, pour une maison individuelle, on obtient la régression linéaire ci-contre et une température de non-chauffage de 14,7 °C avec un coefficient de corrélation de 0,9.



Dans l'illustration 46 sont reportées les températures expérimentales de non-chauffage obtenues avec suffisamment de confiance: un coefficient de régression supérieur à 0,8 et une température de non-chauffage inférieure de plus d'un degré par rapport à la température de consigne. En effet, cette température de non-chauffage ne peut pas toujours être observée, cela dépend de la conduite de la gestion du chauffage du bâtiment et de la nature de l'occupation. Si la température de consigne est trop variable ou si l'occupation n'est pas régulière, il n'est pas possible d'observer une température de non-chauffage.

Sur l'échantillon retenu, majoritairement du logement, on observe ainsi que pour plus de deux tiers des bâtiments, la température de non-chauffage est autour de 15 °C, voire pour certains de 12 °C.

Illustration 46 - Température expérimentale de non-chauffage déterminée par régression linéaire



À retenir

Pour les bâtiments à basse consommation, le niveau des degrés jours n'apparaît plus comme un indicateur suffisant pour caractériser, à lui seul, l'impact du climat sur la consommation de chauffage. De plus, la température statistique de non-chauffage des bâtiments résidentiels est souvent nettement inférieure à 18 °C, température actuellement retenue pour déterminer la rigueur climatique en DJU.

2.3 Impact sur la consommation de chauffage

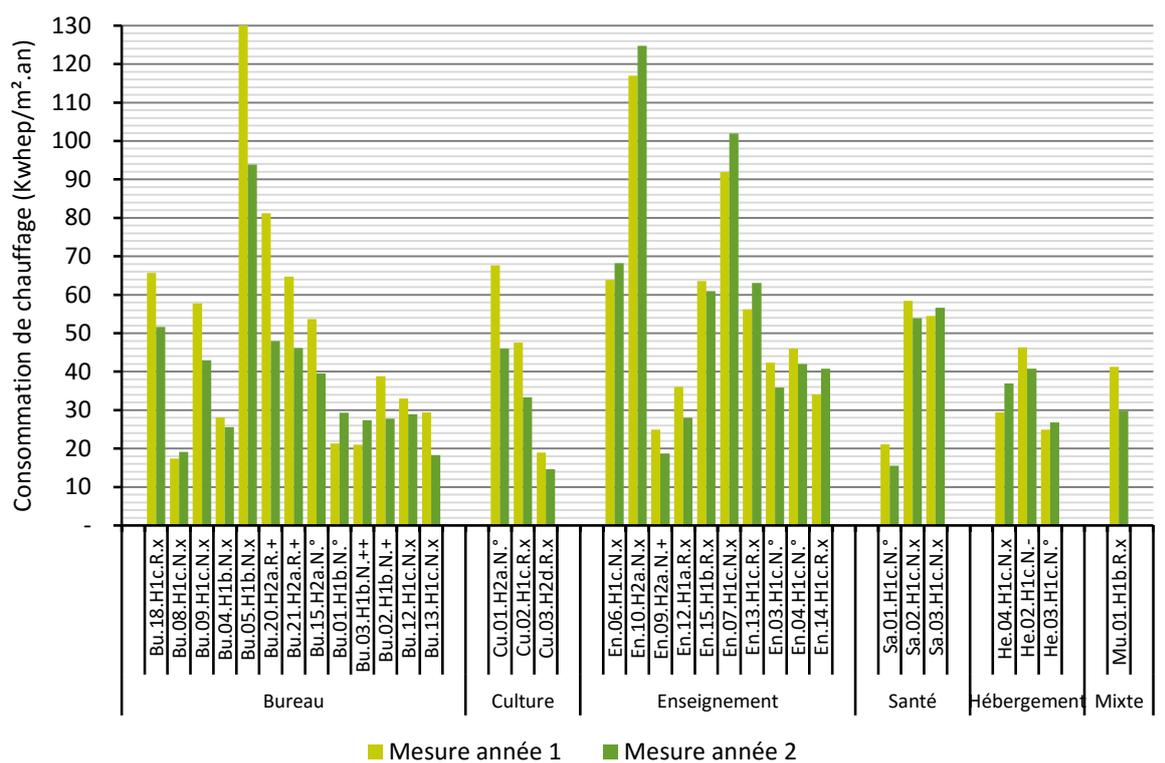
Nous avons vu au § 2.1 que les écarts de température peuvent être importants par rapport à la météo de référence de la réglementation thermique 2005.

Pour évaluer l'impact de cet écart, la consommation d'énergie de chauffage de l'étude thermique réglementaire a été recalculée avec les valeurs de la météo réelle mesurées in situ ou à la station météorologique la plus proche (Annexe).

On voit dans l'illustration 47 que c'est dans les zones H1 et H3 que la météo mesurée est le paramètre le plus sensible pour les consommations de chauffage (+/- 6 kWh_{ep}/m².an en moyenne en zone H1 et H3 contre +/- 3,5 kWh_{ep}/m².an en zone H2). C'était attendu, puisque nous avons vu au § 2.1 que la météo mesurée en zone H2 est proche de la météo de la station de référence.

Pour la zone H1, certes les écarts en DJU par rapport à la météo de référence de la réglementation thermique 2005 étaient moins importants que dans les autres zones climatiques, mais ils sont plus impactants, car le climat est plus froid. Pour la zone H3, la sensibilité importante est due aux écarts importants par rapport à la météo de référence de la réglementation thermique 2005.

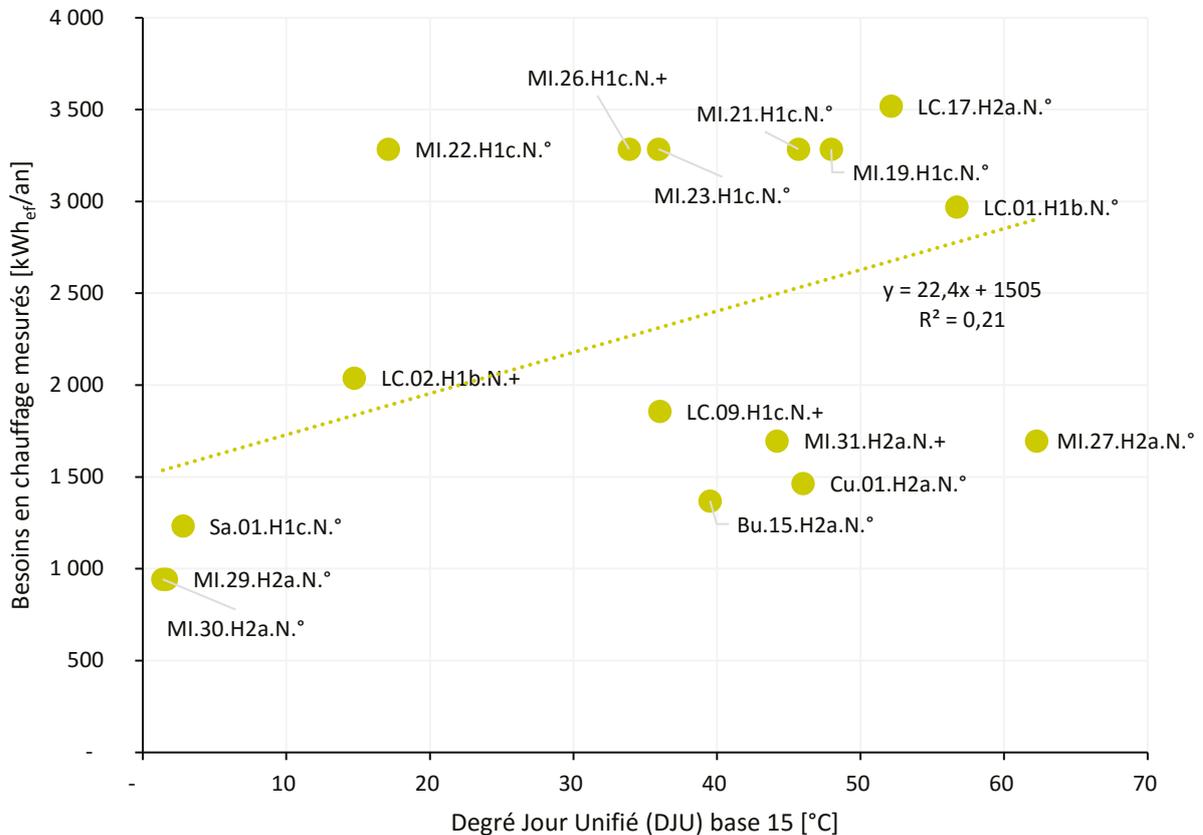
Illustration 47 – Consommation de chauffage recalculée avec la météo réelle



Pour les bâtiments étudiés, les conditions météorologiques réelles font varier la consommation de chauffage de l'étude thermique réglementaire, en moyenne de +/- 5 kWh_{ep}.m².an. À titre de comparaison, la variation de la météo d'une année de suivi à l'autre impacte en moyenne la consommation de +/- 3 kWh_{ep}.m².an.

Dans la réalité, on observe aussi une influence importante de la météo sur les besoins mesurés en énergie utile (Illustration 48). La corrélation n'est certes pas très importante (R^2 de 0,79), mais elle est du même ordre de grandeur que celle observée pour la température de consigne ou l'isolation de l'enveloppe (U_{bat}).

Illustration 48 – Besoin de chauffage mesuré en fonction des DJU mesurés



Il a été observé sur l'échantillon des variations relatives importantes du nombre de jours de chauffage d'une année où l'hiver est rude à une année où l'hiver est doux. Cela contribue à donner à la météo un très fort effet de levier. Cet effet est d'autant plus important dans les bâtiments compacts, et en particulier dans les petits logements d'habitation collective où la densité d'apports thermiques internes tend alors à augmenter, réduisant encore un peu plus le besoin de chauffage et la période de chauffe.

À retenir

Les conditions météorologiques annuelles peuvent significativement faire varier la consommation de chauffage d'un bâtiment à basse consommation :

- en moyenne de +/-5 kWh_{ep}/m².an par rapport au climat de référence de la zone climatique concernée ;
- et en moyenne de +/-3 kWh_{ep}/m².an d'une année à l'autre.



Conditions d'occupation

L'essentiel

Les conditions d'occupation sont un facteur important de la consommation énergétique du fait de leur impact sur la consommation d'électricité spécifique mais aussi sur celle des postes dits réglementaires. Leur influence sur la consommation en chauffage d'une part, sur la consommation en eau chaude sanitaire d'autre part, est non négligeable. L'évaluation de la température de consigne pour l'installation de chauffage, la mise en évidence des réduits existants et l'estimation des apports thermiques des occupants et des appareils, à partir des mesures de température d'air intérieur, des consommations électriques des appareils, ainsi que des enquêtes réalisées auprès des occupants, sont indispensables pour estimer leur impact sur la consommation de chauffage. La mesure du volume d'eau chaude sanitaire consommé ou de la quantité d'énergie fournie pour produire cette eau chaude est le reflet de leur impact sur la consommation du poste eau chaude sanitaire. Ces différentes données permettent alors d'apporter des explications à l'écart de consommation, pour ces postes, entre la valeur mesurée et la valeur calculée dans l'étude thermique réglementaire.

L'analyse montre que les températures de consigne pratiquées pour le chauffage présentent des variabilités importantes dans l'habitat et les bureaux, alors qu'elles sont plus homogènes dans les autres bâtiments tertiaires. Quelle que soit la destination d'usage, les températures de consigne pratiquées sont généralement supérieures aux valeurs de l'étude thermique réglementaire de 0 à 3 °C. Cela impacte les besoins en chauffage, donc la consommation. Tous usages confondus et en moyenne, suite à l'analyse des bâtiments du panel, les besoins en chauffage augmentent au global de 3 kWh_{ef}/m² par degré supplémentaire, cette variation pouvant être plus faible pour des bâtiments avec une enveloppe très isolée. Logiquement la consommation de chauffage demeure aussi très sensible à la température de consigne, et la règle générale d'une hausse de 7 % de la consommation de chauffage pour 1 °C de plus n'est plus utilisable. Il vaut mieux raisonner en valeur absolue. Ainsi, pour les bâtiments étudiés, on observe une hausse de l'ordre de 1,6 kWh_{ep}/m².an pour les bureaux, de 3 à 4 kWh_{ep}/m².an pour l'habitat individuel et de 2 kWh_{ep}/m².an pour l'habitat collectif, pour une augmentation de 1 °C de la température.

Sur ce panel, l'existence de réduits de nuit et de week-end a pu être analysée. Il en ressort pour l'habitat que les réduits de soir ou de nuit sont très fréquents dans les maisons individuelles mais beaucoup moins dans le collectif, peu importe l'inertie ou le système de chauffage du bâtiment. L'existence d'un réduit de nuit en maison individuelle tend à diminuer les besoins en chauffage par rapport au calcul réglementaire. Cette tendance s'accroît lorsque le réduit de nuit devient un arrêt de chauffage la nuit.

L'existence des réduits de nuit est variable pour le tertiaire, très fréquente pour les bureaux et les bâtiments d'enseignement, apparemment moins pour les autres destinations d'usage. Pour le bureau, lorsqu'un réduit de nuit est avéré (diminution de la température de la pièce), son effet sur les besoins en chauffage est plutôt faible (pas de diminution marquée).

Néanmoins, pour toutes les destinations d'usage, il est vrai avec plus ou moins d'amplitude selon qu'un réduit de nuit existe ou non, les températures horaires les plus basses sont observées en moyenne entre 5 h et 8 h, ce qui coïncide avec des besoins en chauffage maximaux (relance du chauffage) entre 5 h et 9 h. La pointe dépend ensuite du bâtiment.

Pour certains bâtiments tertiaires, des réduits de week-end existent ensuite en complément. Ils sont très fréquents dans les bureaux et les écoles et sont suivis d'une relance le lundi.

Ainsi ces différentes régulations sont des sources d'écart entre la consommation en chauffage mesurée et celle de l'étude thermique réglementaire.

Les apports internes des occupants et des équipements constituent également un paramètre qui impacte le bilan thermique du bâtiment. Ramenés à la surface, ils sont au global presque deux fois plus élevés dans les bureaux que dans l'habitat. Dans les bâtiments à basse consommation, les apports internes représentent alors une part de plus en plus importante dans la couverture des besoins de chauffage. D'où une grande sensibilité aussi de la consommation de chauffage à la variation des apports internes.

L'analyse permet enfin de considérer l'impact de ces différents paramètres ensemble.

Elle montre que les conventions réglementaires, surtout sur la température de consigne et le climat, sont très impactantes sur la consommation en chauffage pour les bâtiments fortement isolés thermiquement. Il y a alors un écart entre le résultat du calcul réglementaire et la mesure. Cela est moins marqué pour les bâtiments à forte inertie mais l'écart existe pour toutes les destinations d'usage.

Il en est de même pour la convention sur les besoins en ECS dans l'habitat individuel. La consommation du poste ECS est alors sensible à la variation des besoins évalués en ECS.

Pour rappel, la méthode Th-CE retient les hypothèses suivantes : les horaires d'occupation et les températures de consigne de chauffage correspondent à des pratiques moyennes, différenciées par destination d'usage des bâtiments.

Dans la méthode Th-CE, l'occupation est prise en compte au travers :

- de la présence des personnes (scénario d'occupation) ;
- des besoins des occupants :
 - en température de consigne de chauffage (ou de refroidissement, le cas échéant),
 - en volume d'eau chaude sanitaire (ECS) puisée à 40 °C ;
- des apports thermiques des personnes et des appareils électriques (y compris d'éclairage), appelés apports internes.

Dans le cadre de ce rapport, toutes ces données ont pu être analysées sur le panel ou une partie du panel, en fonction des éléments disponibles.

3.1 Température de chauffage

3.1.1 Les températures de consigne constatées

Plusieurs températures sont à distinguer :

- la **température de consigne (ou de chauffage)**, qui est la température que l'on souhaite maintenir stable et homogène pour l'air ambiant d'un local dans la zone d'occupation. Elle peut être variable en fonction d'un planning horaire (période d'occupation et d'inoccupation)
- la **température minimale de confort**, qui est définie par convention, par la réglementation thermique ;
- la **température de consigne de la zone d'occupation** du local pour l'installation de chauffage.

Pour l'obtenir en permanence dans le local, la température de consigne de chauffage doit être supérieure à la **température minimale de confort**. Il existe donc un écart moyen, appelé variation spatio-temporelle, entre la température conventionnelle minimale de la réglementation thermique et la température de consigne de chauffage du local. Celui-ci dépend de deux composantes :

- une variation temporelle liée à la précision des régulations et à l'inertie des émetteurs ;
- une variation spatiale pour tenir compte du mode d'émission de chaleur, de la stratification de l'air et de la hauteur sous plafond du local (écart de 0 à 0,4 °C pour les locaux de moins de quatre mètres de hauteur¹³).

Les bâtiments étudiés ne présentant pas de grande hauteur sous plafond, le coefficient spatial n'a pas d'influence et l'analyse peut ne considérer que la température conventionnelle minimale de la réglementation thermique corrigée de la variation temporelle et l'apparenter à la **température de consigne de la zone d'occupation du local** pour l'installation de chauffage.

13. Dans la méthode Th-CE 2005.

Illustration 49 – Les différentes températures prises pour référence

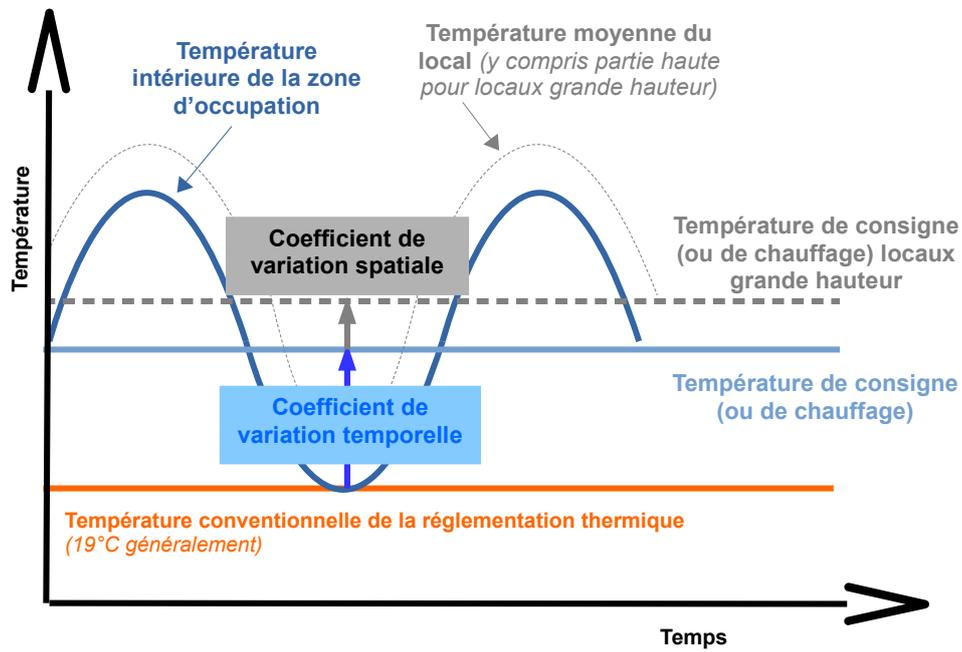
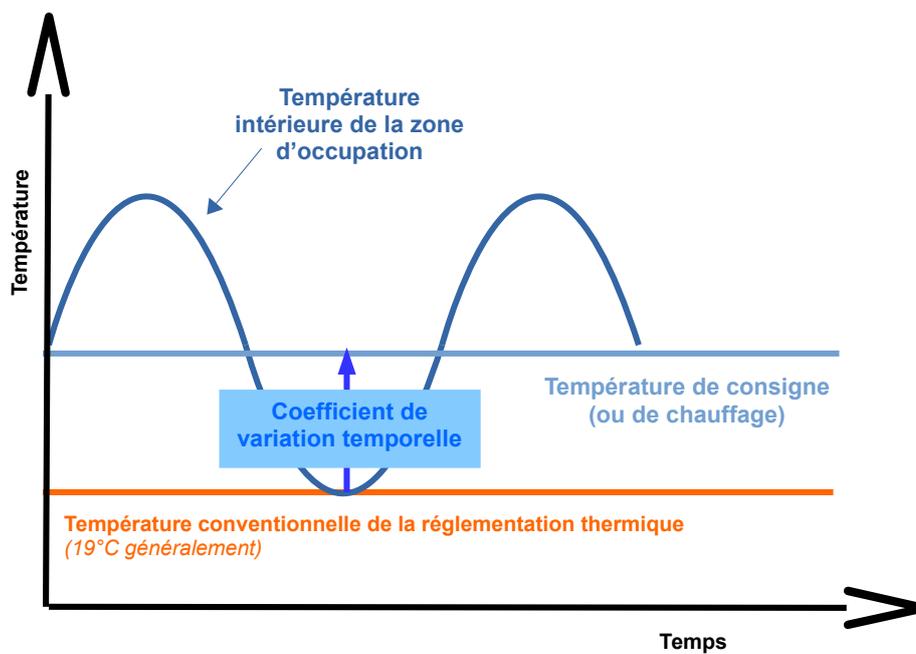


Illustration 50 – Les différentes températures prises pour référence dans le contexte de l'échantillon



La température conventionnelle minimale de la réglementation thermique est de 19 °C en général (21 °C pour les établissements sanitaires¹⁴, 15 °C pour les bâtiments sportifs, de stockage, industriels et de transport).

Ces différentes températures ont pu être étudiées pour 36 opérations du panel (opérations avec suffisamment de données exploitables sur la température).

Pour ces opérations, à cette valeur conventionnelle prise comme température minimale de fonctionnement des émetteurs s'ajoute une variable temporelle, **comprise entre + 0,4 et + 3,8 °C avec près de 90 % des valeurs comprises entre +0 et +2 °C**, pour obtenir la **température de consigne de l'étude thermique réglementaire** servant au calcul de consommation.

La température de consigne de l'étude thermique réglementaire peut alors être comparée, aux incertitudes près de la mesure, à la température de consigne pratiquée telle qu'elle est reconstituée à partir des mesures de la **température intérieure de la zone d'occupation**, selon la méthode exposée en annexe A.2.3.

Si l'on prend en compte les caractéristiques de la régulation, en fonction des émetteurs, l'histogramme de l'illustration 51 montre que, sur notre échantillon, la **température de consigne pratiquée (en vert) est généralement supérieure à celle de l'étude thermique réglementaire (en bleu) avec des variabilités différentes selon les destinations d'usage** :

- entre -3 °C et +5 °C pour l'habitat collectif avec 6 valeurs sur 9 comprises entre +1 et +3 °C. La variabilité pour l'hébergement se situe également dans cet intervalle;
- entre -2,5 °C et +3,5 °C pour les maisons individuelles, avec 8 valeurs sur 11 comprises entre 0 et +2 °C;
- entre 0 et +0,5 °C pour les bâtiments de santé;
- entre 0 et +3 °C pour les bureaux avec 3 valeurs sur 6 inférieures à +2 °C;
- entre -1 °C et +1,5 °C pour les autres bâtiments tertiaires (enseignement) avec 4 valeurs sur 6 comprises entre -0 et +1 °C;
- pour le bâtiment mixte, elle est très proche, différence de -0,1 °C.

La variabilité de la température de consigne est plus élevée dans l'habitation. Cela n'est pas nécessairement dû au fait que l'occupant est moins vertueux. Celui-ci ne peut pas toujours agir sur le réglage de cette température pour l'optimiser lorsque l'installation de chauffage est collective, ou il ne sait pas réguler son chauffage, en particulier pour les installations individuelles. Des témoignages sur la possibilité de régulation de la température de chauffage ont été obtenus pour 26 opérations d'habitation (18 maisons individuelles). Dans 17 cas, dont seulement 4 collectifs, un dispositif de régulation par thermostat central existe. Pour la moitié des maisons, les occupants n'ont jamais modifié les réglages de la température de consigne de leur logement.

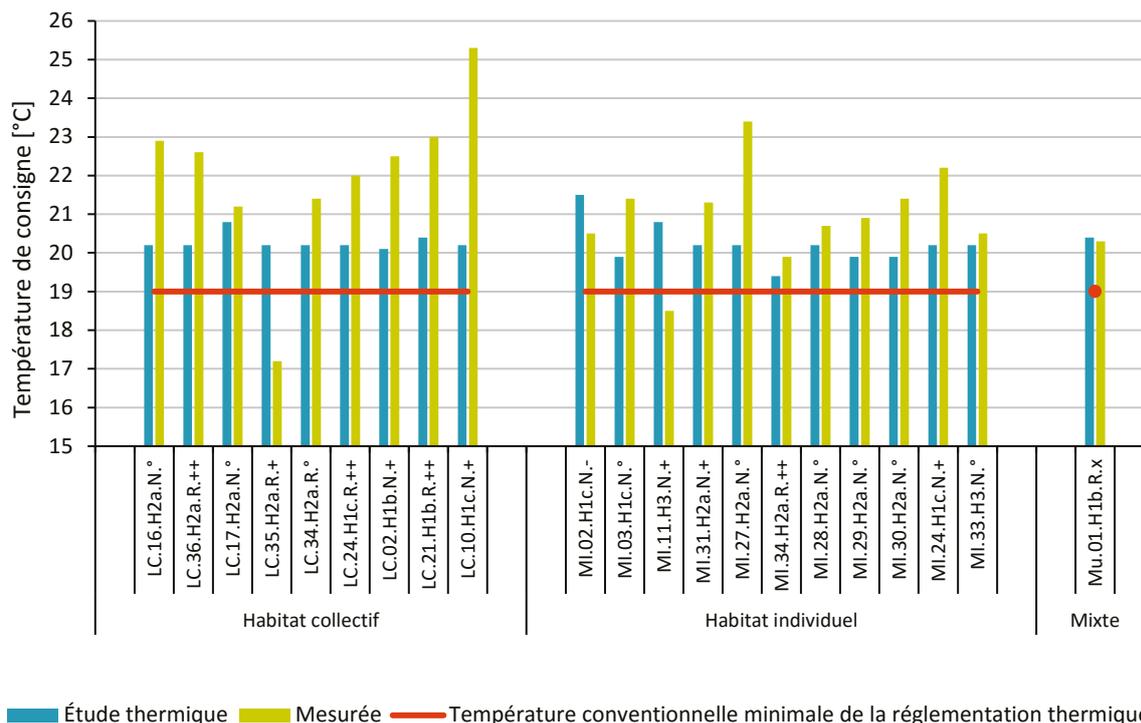
Concernant l'étude du panel des 36 opérations, au global la variabilité de la température de consigne est supérieure dans l'habitat collectif par rapport aux maisons individuelles où l'occupant peut généralement plus facilement régler son installation. Ainsi la variabilité moyenne pour l'habitat collectif est proche de 1,7 °C alors qu'elle n'atteint que 0,8 °C pour l'habitat individuel.

Pour les tertiaires, la variabilité de la température de consigne est globalement plus faible. En effet, pour cette destination d'usage, l'occupant n'a en général pas la main sur la température de consigne du système de chauffage. Il s'agit souvent d'un système avec régulation centralisée où la température de consigne est réglée par le gestionnaire qui s'appuie sur la valeur réglementaire. Pour le panel, cela se vérifie particulièrement pour les bâtiments de santé et d'enseignement. Cela est moins vrai pour les bâtiments de bureau où la variabilité moyenne est proche de 1,5 °C (0,3 °C si on supprime les trois valeurs extrêmes).

14. Dans notre échantillon, parmi les opérations avec des données de température exploitables: une maison médicale et deux établissements d'hébergement pour personnes âgées dépendantes.

Ces observations sont confirmées par les enquêtes réalisées auprès des suiveurs des opérations. Sur les 11 témoignages recueillis sur des opérations de bâtiments tertiaires, 6 déclarent que les salariés ou occupants réguliers ne peuvent pas modifier la température de chauffage et qu'elle est fixée par leur direction. Parmi ces opérations, il n'y a qu'un seul bureau et une majorité de bâtiments d'enseignement (dont deux crèches) et de santé. Dans les bâtiments de bureaux (5 témoignages), les salariés ou occupants réguliers ont en revanche la plupart du temps possibilité de régler cette température même si pour la moitié des bureaux les marges de modification sont limitées.

Illustration 51 – Les températures de consigne cibles et pratiquées



Pour un habitat collectif avec chaudière collective bois, en Lorraine :

« Les températures de consigne pratiquées dans les différents logements sont élevées : 22,7 °C, 22,4 °C et 24,8 °C. »

À retenir

Dans les hypothèses du calcul réglementaire, sur l'échantillon, la température de consigne des équipements de chauffage est généralement supérieure de 0,4 à 2 °C à la température minimale de confort (19 °C généralement), afin que le local chauffé ne soit jamais en défaut de confort, soit entre 19,4 et 21 °C selon la nature des régulations et des émetteurs.

Pour l'habitat et les bureaux, les températures de consigne pratiquées sont généralement supérieures de 0 à 3 °C aux valeurs de l'étude thermique réglementaire ci-avant, soit généralement entre 20 et 23 °C, avec des extrêmes autour de 17 °C et 25 °C.

3.1.2 Analyse du besoin de chauffage mesuré (ou énergie utile de chauffage) en fonction de la température de consigne

Si l'on trace les besoins de chauffage mesurés (relevés de l'énergie utile) en fonction de la température de consigne (Illustration 52), on observe bien une **tendance à la hausse des besoins en fonction de la température: entre + 2 kWh/m² et + 10 kWh/m² avec une valeur moyenne à environ + 3 kWh/m² par degré Celsius** (un peu moins que par le recalcul pour la consommation de chauffage, voir § 3.1.3). La corrélation est toutefois très faible, l'échantillon étant réduit, et pour une même température l'amplitude des besoins mesurés est importante.

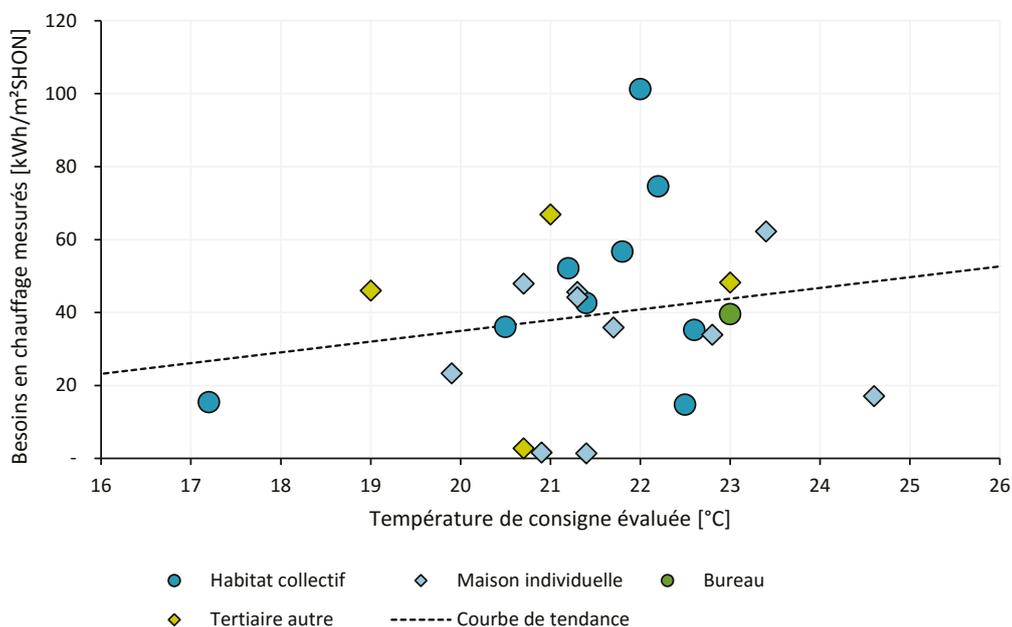
Les opérations s'écartant le plus de la régression sont celles **dont la température de consigne n'est pas le facteur principal d'explication du besoin de chauffage**.

Ainsi pour le bâtiment LC.18.H2a.N.° l'écart est dû à des **apports internes globaux faibles** par rapport aux autres habitats collectifs (Illustration 70).

Pour l'opération LC.24.H1c.R.++ cela semble dû à une **combinaison de facteurs défavorables**, comme un coefficient de déperditions évaluées $U_{\text{bât}}$ assez élevé, une inertie très lourde, un climat rigoureux et des pertes au niveau du réseau de distribution inter-bâtiments comptées dans la mesure des besoins de chauffage (mesure en sortie de chaudière en chaufferie alimentant deux bâtiments).

Pour les opérations plutôt performantes, malgré une température de consigne pratiquée élevée, la principale explication vient d'un $U_{\text{bât}}$ très performant (§ 4.2.3).

Illustration 52 – Évolution du besoin de chauffage (en énergie utile) au regard de la température de consigne pratiquée pour les bâtiments chauffés au gaz ou en effet joule



À retenir

Une augmentation de température de consigne de 1 °C implique en moyenne une augmentation de 3 kWh/m² tous usages confondus sur les besoins en chauffage (dans tous les cas entre + 1 kWh/m² et + 10 kWh/m²). Toutefois, la température de consigne n'est pas le seul déterminant sur le besoin de chauffage: si l'isolation de l'enveloppe est très performante, une augmentation de température aura moins d'impact.

3.1.3 Impact calculé des températures de consigne pratiquées sur la consommation de chauffage

Le recalcul de la consommation de chauffage avec les températures de consigne pratiquées a été effectué sur une partie de l'échantillon. Les résultats ont été obtenus pour 45 opérations (même panel de 49 opérations que précédemment, moins un bureau, deux bâtiments d'enseignement et un collectif).

Fort logiquement, la consommation de chauffage évolue dans le même sens que la température de consigne, donc à la hausse (Illustration 53) pour la majorité des opérations et à la baisse pour les quatre opérations pour lesquelles la température de consigne pratiquée est plus faible (un bâtiment d'enseignement et trois maisons individuelles). Cependant, ces évolutions varient différemment selon les destinations d'usage :

- pour les bureaux, les écarts à la hausse s'étalent de 0,6 à 5 kWh_{ep}/m².an. La consommation de chauffage semble évoluer d'une manière quasi-linéaire avec une augmentation de 1,6 kWh_{ep}/m².an dès que la température augmente de 1 °C (coefficient de régression R²=0,93) ;
- pour les maisons individuelles, il existe des écarts à la hausse qui s'étalent de 0 à 9 kWh_{ep}/m².an en général, avec deux valeurs extrêmes supérieures à 15 kWh_{ep}/m².an, et des écarts à la baisse compris entre -9 et 0 kWh_{ep}/m².an. La consommation de chauffage semble évoluer d'une manière quasilinéaire avec une augmentation rapide de 3 à 4 kWh_{ep}/m².an dès que la température augmente de 1 °C (coefficient de régression R²=0,83) et réciproquement pour la diminution. Avec l'augmentation du panel, et notamment l'ajout d'opérations supplémentaires présentant une température de consigne pratiquée plus faible, cette règle se voit maintenant vérifiée quelle que soit la température de consigne pratiquée et la zone climatique ;
- pour les logements collectifs, les écarts à la hausse s'étalent de 0,7 à 8 kWh_{ep}/m².an avec une valeur extrême à 13 kWh_{ep}/m².an mais, pour la majorité des opérations, l'écart reste inférieur à 4 kWh_{ep}/m².an. Les écarts de la consommation de chauffage sont plus dispersés que pour les bureaux et évoluent d'une façon moins linéaire que pour les maisons individuelles et selon une pente plus faible. La consommation de chauffage augmente de 2 kWh_{ep}/m².an pour une augmentation de 1 °C de la température de consigne (coefficient de régression R²=0,79). Ces opérations sont globalement situées dans les zones climatiques H1 (b et c) et H2a (au moins 5 opérations pour chaque zone) avec des rigueurs hivernales très différentes. Ainsi, étant donné la diversité des climats représentés pour les deux types d'habitat, la baisse des écarts pour le collectif ne peut pas être uniquement expliquée par le facteur climatique. Elle semble plutôt être une conséquence de cette destination d'usage : les transferts thermiques entre les différents logements voisins permettent d'atténuer l'effet d'une variation de la température de consigne pratiquée ;
- pour les autres bâtiments tertiaires (4 opérations d'enseignement, un lieu d'hébergement, 2 bâtiments culturels et 2 opérations de santé), les écarts à la hausse s'étalent de 0 à 12 kWh_{ep}/m².an (plus une opération en zone méditerranéenne avec un écart égal à -5 kWh_{ep}/m².an). L'évolution de la consommation de chauffage paraît plus importante que pour les autres destinations d'usage, bien que le nombre de données soit encore restreint. Avec ce panel, l'augmentation pour les bâtiments de santé est de l'ordre de 7 à 8 kWh_{ep}/m².an pour une augmentation de 1 °C de la température. Elle atteint +6 kWh_{ep}/m².an pour les bâtiments d'enseignement. La consommation en chauffage de ces deux destinations d'usage est donc très sensible à la température de consigne pratiquée.

Cela ne se vérifie pas pour les bâtiments culturels pour lesquels les données disponibles concluent à une augmentation de 1 à 2 kWh_{ep}/m².an pour une augmentation de 1 °C de la température. Ces tendances devront être confirmées avec l'augmentation du panel.

Le lien avec la destination d'usage a pu être maintenu en analysant les différentes énergies mises en œuvre (Illustration 54) : la surconsommation est variable en fonction des énergies et il n'y a pas de différence marquée entre les opérations utilisant l'électricité et les autres. Par exemple, l'augmentation de la consommation de chauffage pour une augmentation de 1 °C de la température est proche pour le gaz (+2,7 kWh_{ep}/m².an) et pour l'électricité (+2,1 kWh_{ep}/m².an).

L'impact de l'inertie du bâtiment a également été testé (Illustration 55) et il n'y a pas de relation directe entre la variation de consommation en chauffage et l'inertie.

Ainsi, avec la diversité du panel, les résultats précédents ne peuvent pas être expliqués par une prédominance énergétique pour une destination d'usage ou une classe d'inertie spécifique. Ils ne sont donc pas directement la conséquence de coefficients de conversion énergie primaire énergie finale différents selon les énergies, ni de classes d'inertie diverses, mais ils sont bien le résultat de l'impact de la température de consigne pratiquée pour chaque destination d'usage.

La sensibilité à la température de consigne pratiquée a aussi été étudiée en fonction de la consommation mesurée en chauffage pour les deux années en considérant, de façon simpliste, que pour chaque bâtiment, il y a proportionnalité entre la variation de la consommation et celle de la température (chaque degré supplémentaire engendre alors la même augmentation pour la consommation et on confronte cette valeur et la consommation mesurée). L'analyse montre que ce n'est pas le seul facteur influent. Ainsi la variation liée à une augmentation de température n'est pas forcément plus élevée pour un bâtiment avec une consommation en chauffage plus importante. Le phénomène est plus complexe (influence combinée de la performance de l'enveloppe et du rendement des appareils).

Les bâtiments étant performants, ces différences sont très importantes en valeur relative, ce qui souligne l'influence de la moindre augmentation de température de consigne: la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température est proportionnellement beaucoup plus importante.

Les recalculs aboutissent aux résultats suivants :

- pour les bâtiments de bureaux, une augmentation de 0,2 à 3 °C sur la température de consigne entraîne une augmentation de 5 à 115 % de la consommation de chauffage ;
- pour les bâtiments d'enseignement, une augmentation de 0 à 1,5 °C sur la température de consigne entraîne une augmentation de 0 à 40 % de la consommation de chauffage ;
- en habitat individuel, une augmentation de 0 à 6 °C sur la température de consigne entraîne une augmentation de 0 à 70 % de la consommation de chauffage ;
- en habitat collectif, une augmentation de 0,4 à 3 °C sur la température de consigne entraîne une augmentation de 6 à 175 % de la consommation de chauffage.

Pour chaque fonction, ce n'est pas forcément le bâtiment avec la plus forte augmentation de la température qui affiche la plus forte augmentation de la consommation de chauffage.

Illustration 53 – Évolution de la consommation de chauffage après recalcul avec la température de consigne pratiquée

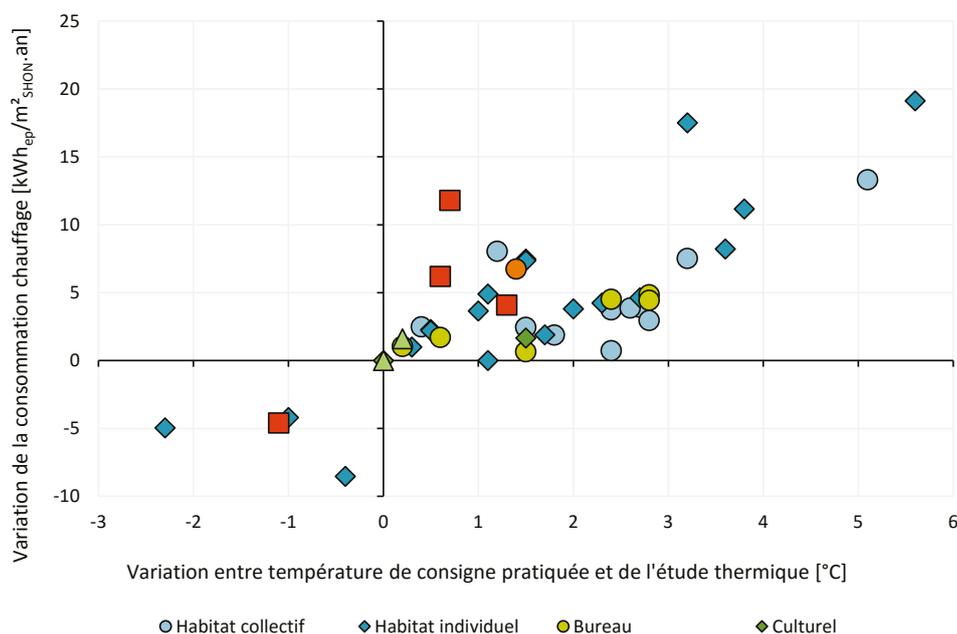


Illustration 54 – Évolution de la consommation de chauffage après recalcul avec la température de consigne pratiquée – Analyse en énergie de chauffage

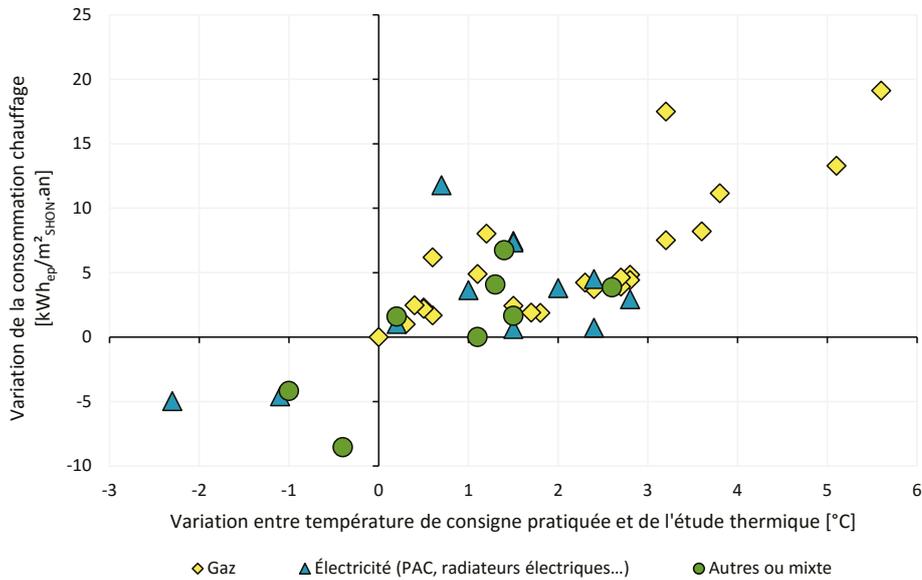
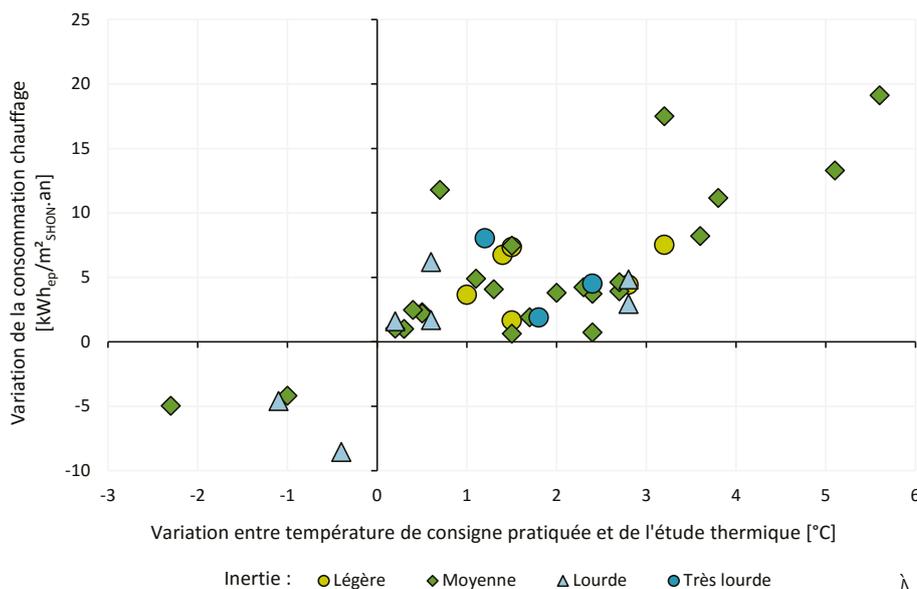


Illustration 55 – Évolution de la consommation de chauffage après recalcul avec la température de consigne pratiquée – Analyse en inertie



À retenir

Pour les bâtiments fortement isolés thermiquement :

- la règle générale d'une sensibilité de 7 % de la consommation de chauffage pour 1 °C d'écart de température intérieure n'est plus utilisable. Il vaut mieux raisonner en valeur absolue. L'analyse montre une hausse de l'ordre de 1,6 kWh_{ep}/m².an pour les bureaux, de 3 à 4 kWh_{ep}/m².an pour l'habitat individuel et de 2 kWh_{ep}/m².an pour l'habitat collectif, pour une augmentation de 1 °C de la température ;
- la sensibilité dépend de la destination d'usage avec une sensibilité supérieure pour les bâtiments de santé, d'enseignement et les maisons individuelles ;
- la consommation de chauffage demeure très sensible à la température de consigne, avec de l'ordre de 0 à 9 kWh_{ep}/m².an pour l'habitat et de 0 à 6 kWh_{ep}/m².an pour les bureaux, mais pouvant monter jusqu'à +19 kWh_{ep}/m².an dans certains cas.

3.2 Réduits de température de chauffage

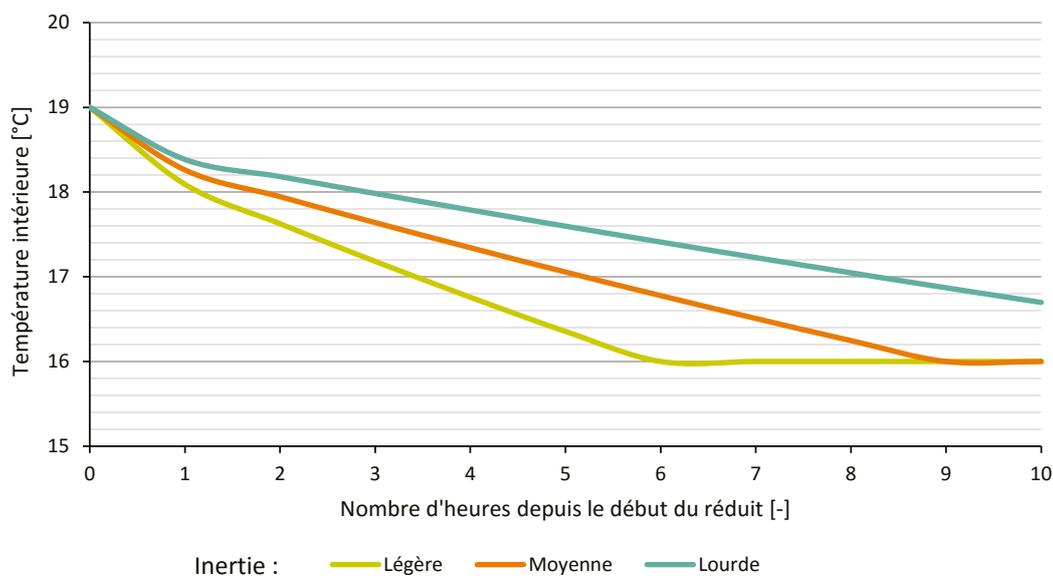
Dans la partie précédente, la température de consigne de l'étude thermique réglementaire pour les périodes d'occupation a été comparée à la température de consigne pratiquée en occupation et l'impact de ce paramètre sur les besoins puis sur la consommation en chauffage a été mis en évidence.

Avec le panel actuel, il est également possible de s'intéresser aux réduits de chauffage pour analyser ceux qui sont pratiqués dans les bâtiments. Aussi a été développée une méthode de caractérisation des réduits de chauffage et de leur impact sur les besoins de chauffage.

Sont présentés ici les différents résultats obtenus, après une introduction sur le phénomène physique de réduit de chauffage.

Pour mieux comprendre le phénomène, il est important de savoir qu'un bâtiment isolé au niveau basse consommation présente une évolution relativement lente de la température intérieure en cas de coupure de chauffage. Le graphique ci-dessous illustre, par exemple, l'évolution de la température intérieure pour une baisse de la température de consigne pratiquée (ici 19 °C) de 3 °C pendant 10 heures, en fonction de l'inertie du bâtiment et lorsque la température extérieure est égale à 0 °C (cas favorable par rapport aux conditions moyennes hivernales).

Illustration 56 – Simulation de l'évolution de la température intérieure en régime libre en fonction de l'inertie du bâtiment



Pour la période de 0 à 4 h, la température de consigne pratiquée pour le réduit, ici 16 °C, n'est pas la température atteinte avec la fréquence la plus élevée : sur cette période, elle n'est même jamais atteinte.

En conséquence, une étude statistique des seules températures intérieures mesurées lors du suivi le soir et la nuit ne permet pas de déterminer la température de consigne en mode réduit car, lorsqu'il y a réduit, la température intérieure ne chute pas rapidement.

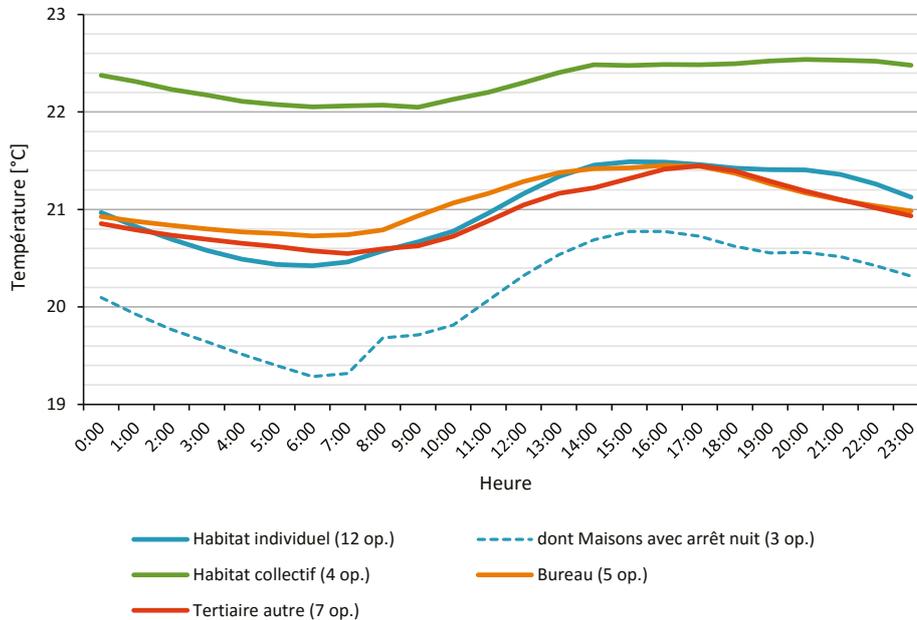
3.2.1 Profils journaliers observés de températures et de fourniture de chauffage

La méthodologie retenue pour évaluer la température de consigne en mode réduit consiste à déterminer les profils horaires moyens journaliers de température intérieure et fourniture de chauffage.

Les résultats ont pu être exploités pour 28 bâtiments du panel. Ils sont présentés en moyenne par destination d'usage.

Le groupe « tertiaires autres » est composé de deux EPHAD, deux crèches, une école primaire, un gîte et un bâtiment culturel. Ces usages étant variés, la gestion du réduct peut différer. Les résultats de ce groupe doivent donc être analysés avec précaution.

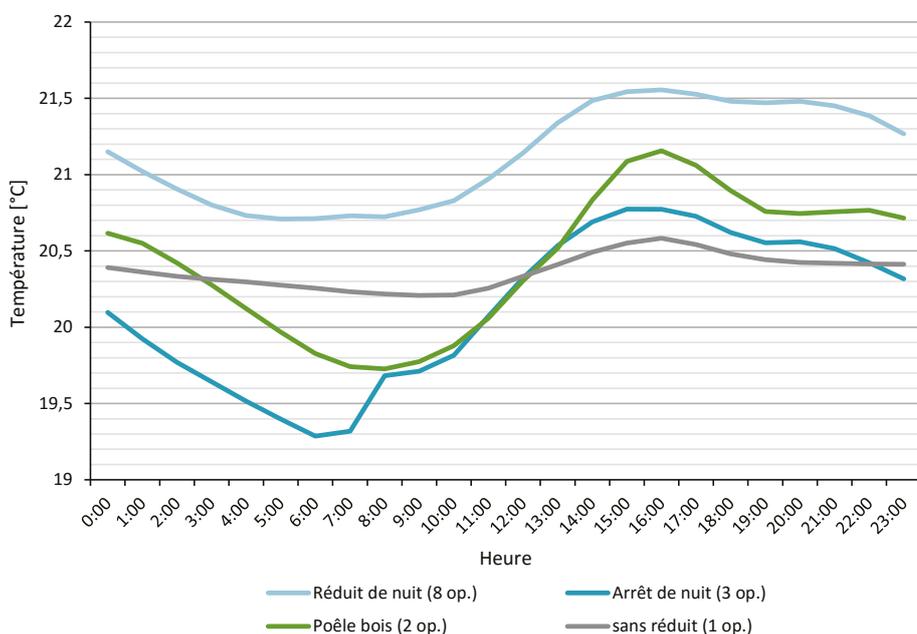
Illustration 57 – Profil horaire moyen journalier de la température intérieure



Pour toutes les destinations d'usage, les températures les plus basses sont observées en moyenne entre 5 h et 8 h. Cela est plus marqué pour les bâtiments présentant un réduct de nuit et en particulier pour les maisons individuelles avec arrêt de chauffage la nuit.

Une analyse comparée de profils journaliers horaires moyens des températures de maisons individuelles présentant des réglages de chauffage différents permet de préciser les horaires et les amplitudes de ces variations de température pour ce type d'habitat courant.

Illustration 58 – Profil horaire moyen journalier de la température intérieure des maisons individuelles



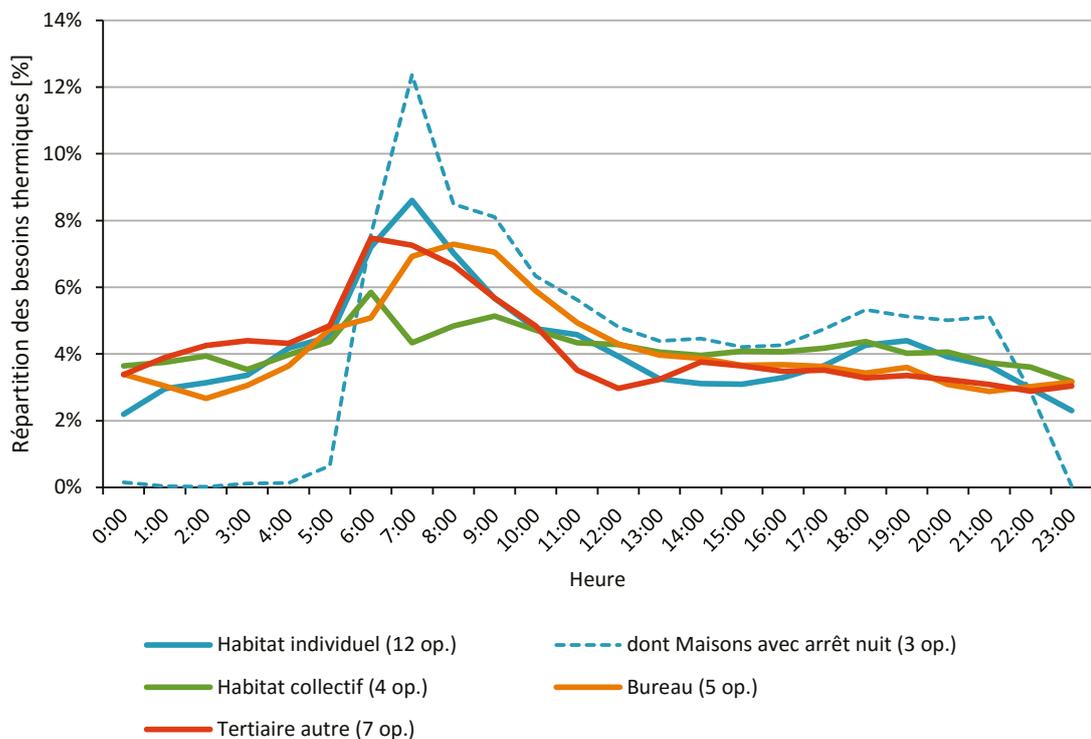
Pour les maisons qui présentent un réduit de nuit (ou un arrêt du chauffage la nuit), les températures minimales sont observées entre 5 h et 6 h, avec une avance d'environ 3 h par rapport au régime sans réduit. Il y a donc un décalage dans la relance de chauffage mais, dans tous les cas, pour ces bâtiments basse consommation, la relance a lieu le matin, entre 5 h et 10 h.

Les maisons chauffées avec un poêle à bois ont un profil de température similaire à celui des maisons avec réduit mais avec un décalage d'environ 1 h (augmentation de la température le matin à partir de 8-9 h), le poêle étant allumé par les occupants lorsqu'ils sont éveillés.

Ces variations de température n'impactent pas le confort. L'analyse du confort pour les maisons avec un réduit ou un arrêt de chauffage la nuit, a montré que celui-ci n'est pas dégradé (ces bâtiments entrent dans le panel de l'analyse Confort thermique et qualité d'usage).

L'analyse des profils horaires moyens journaliers des besoins (fourniture) en chauffage permet de confirmer l'existence de ralentis par la relance matinale. Le phénomène de relance en fin de journée existe aussi, mais il est plus faible.

Illustration 59 – Profil horaire moyen journalier de la fourniture de chauffage



Pour les maisons individuelles qui présentent des réduits de nuit (ou des arrêts de chauffage la nuit), les besoins en chauffage augmentent fortement entre 5 h et 7 h. Cela correspond à la période de relance du chauffage où les besoins sont maximaux (de 7 % à 14 % des besoins journaliers, avec une pointe vers 7 h, pour les opérations avec réduit; de 8 % à 17 % des besoins journaliers, avec une pointe vers 7 h, pour les opérations avec arrêt la nuit).

Cette augmentation a lieu légèrement plus tard pour les bureaux avec un réduit de nuit, plutôt entre 6 h 30 et 9 h, mais reste importante (de 5 % à 14 % des besoins journaliers, avec une pointe vers 8 h).

Elle est beaucoup moins marquée pour les bâtiments sans réduit (logements collectifs notamment) bien que les besoins maximaux soient également plus élevés dans le créneau 6 h-9 h (entre 4 % à 8 % des besoins journaliers). Cela se vérifie aussi pour les bâtiments tertiaires autres. Seul un EPHA D présente des besoins dépassant 10 % sur ce créneau.

À retenir

Les températures les plus basses sont observées entre 5 h et 8 h. Cela est plus marqué pour les bâtiments présentant un réduct de nuit et en particulier pour les maisons individuelles avec arrêt de chauffage la nuit.

Les profils horaires moyens journaliers des besoins en chauffage permettent d'identifier des relances de chauffage associées aux réduits :

- pour les maisons individuelles qui présentent des réduits de nuit (ou des arrêts de chauffage la nuit), la fourniture de chauffage augmente fortement entre 5 h et 7 h avec une pointe vers 7 h ;
- pour les bureaux, avec réduct de nuit, la fourniture de chauffage augmente fortement entre 6 h 30 et 9 h avec une pointe vers 8 h ;
- pour les bâtiments collectifs et tertiaires autres où les réduits de nuit sont moins fréquents, les besoins en chauffage sont également plus élevés dans le créneau 6 h-9 h.

3.2.2 Identification des réduits journaliers et hebdomadaires par la puissance de chauffage

Pour déterminer l'existence d'un réduct ou d'un arrêt de chauffage, la méthode utilisée consiste à analyser le profil moyen de la fourniture de chauffage *via* la puissance de chauffage mise en jeu.

Ce paramètre a été exploité pour mettre en évidence d'une part des réduits en fin de semaine dans les bâtiments tertiaires (qui seraient engendrés par la baisse de température de consigne pratiquée le week-end) et d'autre part des réduits journaliers.

Avant d'aborder les résultats, la mise en œuvre de cette méthode est précisée ci-après.

Pour travailler sur les réduits journaliers, le **coefficient de relance de chauffage** a été défini comme le rapport entre la fourniture de chauffage pendant les quatre heures du profil moyen horaire où la demande de chaud est la plus élevée et la fourniture moyenne journalière. Le coefficient de relance est donc calculé en effectuant le ratio entre la moyenne horaire de la fourniture de chauffage durant les quatre heures consécutives concernées et le besoin horaire moyen journalier.

L'analyse considère que ce coefficient correspond à un effet de relance journalier lorsqu'il est supérieur à 1,25 c'est-à-dire lorsque la fourniture de chauffage ci-dessus représente un supplément d'au moins 25 % par rapport à la charge moyenne journalière (en dessous, il s'agit principalement d'un fonctionnement où la fourniture de chauffage compense les flux déperditifs associés à la température extérieure, en fonction des apports solaires et internes, mais en régime établi). Ainsi le calcul de ce coefficient permet de conclure sur l'**existence des relances journalières et donc des réduits journaliers de chauffage**.

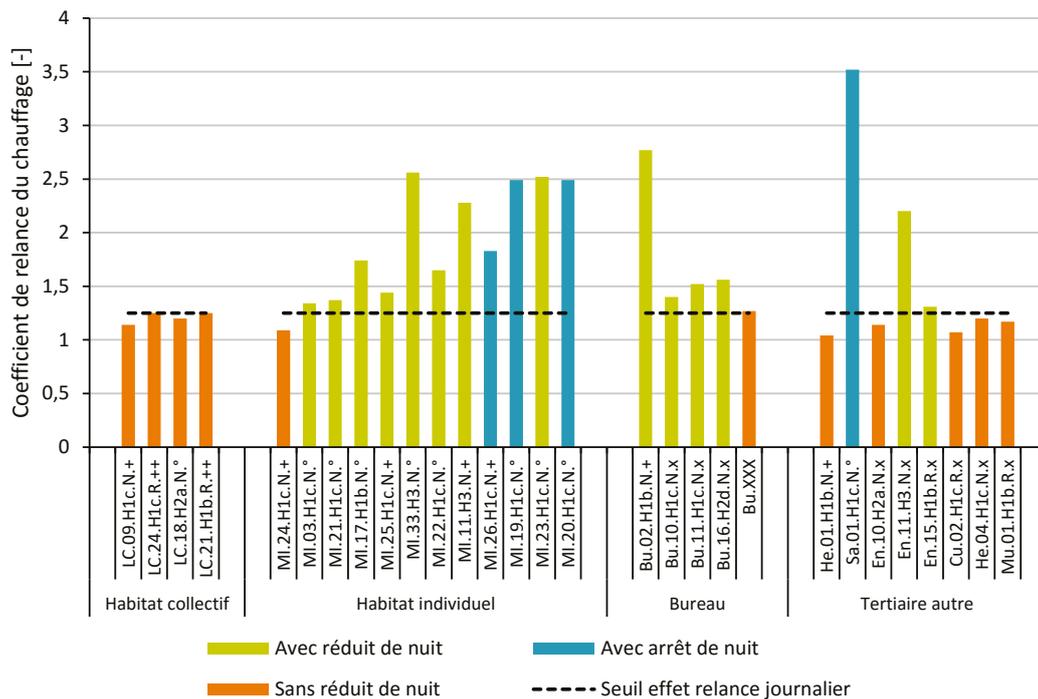
En complément, il est intéressant de travailler avec les huit heures consécutives qui présentent la fourniture de chauffage la moins importante dans le profil horaire moyen journalier. L'**arrêt complet du chauffage** a ainsi été défini comme le cas où la moyenne de la quantité de chaleur fournie pour ces huit heures est inférieure à 10 % de la valeur horaire moyenne journalière.

Une telle analyse a été réalisée sur 29 opérations PREBAT : 5 bureaux, 8 tertiaires autres, 4 collectifs et 12 maisons individuelles.

L'illustration 60 présente les conclusions sur l'existence d'un réduct journalier et le caractérise (réduct de nuit ou arrêt du chauffage la nuit) en fonction des résultats obtenus sur le coefficient de relance de chauffage.

Le réduct journalier peut être plus ou moins avancé le soir, en fonction des horaires de la période de réduct (début entre 17 h et 23 h selon les opérations).

Illustration 60 – Existence d'un réduit de soir ou de nuit pour le chauffage, exploitation du coefficient de relance de chauffage



Pour le tertiaire, un réduit de soir ou de nuit a pu être mis en évidence pour la plupart des bureaux et bâtiments d'enseignement (crèche et école) étudiés. Cela est moins évident pour les autres usages de tertiaire et les situations observées sont diverses : une maison de retraite présente un arrêt de chauffage la nuit alors qu'un EPHAD ne présente pas du tout de réduit par exemple.

L'augmentation du panel permettra de dégager davantage de tendances.

Pour l'habitat, un réduit de soir ou de nuit a pu être mis en évidence uniquement pour les maisons individuelles : cela est vérifié pour 11 des 12 maisons individuelles dont 3 présentant un arrêt de chauffage la nuit. Les logements collectifs ne sont en revanche pas concernés.

L'existence d'un réduit de soir ou de nuit apparaît donc comme récurrente pour les maisons individuelles et les bureaux mais beaucoup moins fréquente pour le collectif.

Existe-t-il un lien entre les pratiques de réduits journaliers et les caractéristiques techniques du bâtiment ?

Différentes pistes ont été envisagées sur 27 bâtiments du panel précédent :

- la pratique du réduit journalier n'est pas liée au caractère individuel ou collectif du mode de chauffage, car les différents bâtiments d'habitation étudiés ici présentent tous un système de chauffage individuel ;
- pour ces systèmes individuels, la pratique du réduit journalier n'est pas liée au type de système de chauffage, car il n'y a pas de correspondance entre le système de chauffage du bâtiment et l'existence ou l'absence de réduit de soir ou de nuit (Illustration 61) ;
- la pratique du réduit journalier n'est pas liée à l'inertie de l'enveloppe (Illustration 62), car il n'y a pas de correspondance entre la classe d'inertie du bâtiment et l'existence ou l'absence de réduit de soir ou de nuit (panel d'étude : 26 bâtiments, le détail sur l'inertie d'un bureau n'étant pas disponible).

Illustration 61 – Existence d'un réduct de soir ou de nuit pour le chauffage en fonction du système de chauffage du bâtiment

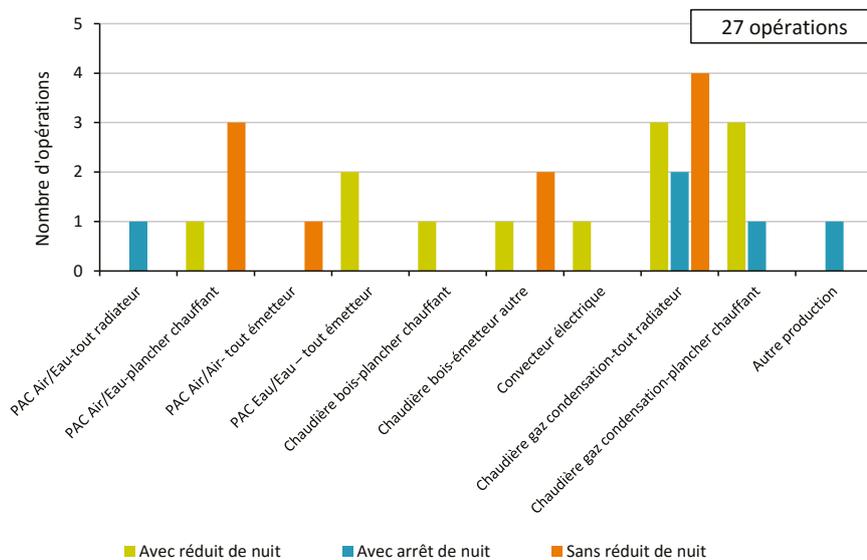
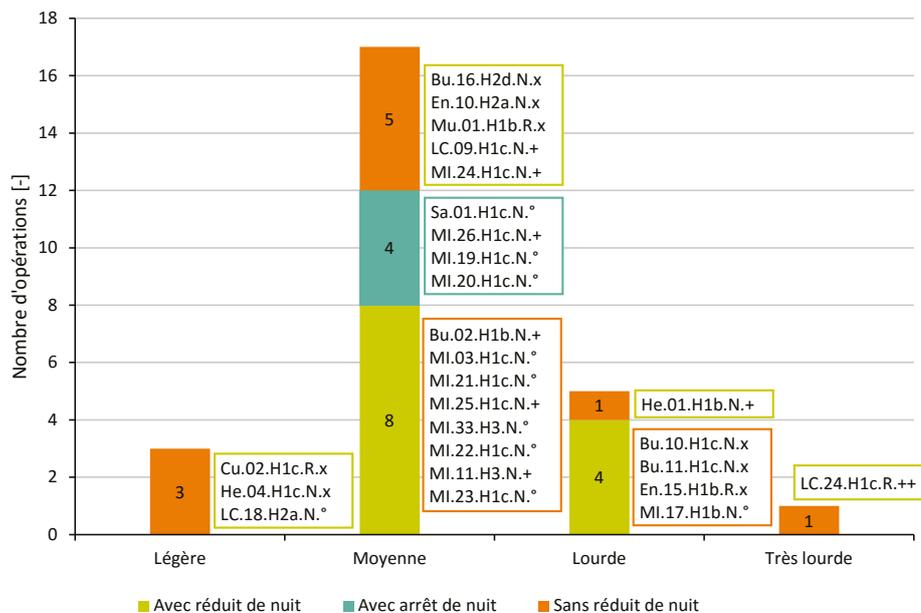


Illustration 62 – Existence d'un réduct de soir ou de nuit pour le chauffage en fonction de l'inertie du bâtiment



En complément, la pratique du réduct journalier a été confrontée à la zone climatique d'implantation. Sur ce panel, 22 bâtiments se trouvent en zone H1 (b ou c) et ils présentent des configurations variées (réduct, pas de réduct ou arrêt). Ainsi il n'y a, a priori, pas de lien direct entre la pratique d'un réduct et la zone climatique. Cela pourra être confirmé avec l'augmentation du panel.

À retenir

Pour l'habitat, les réduits de soir ou de nuit sont très fréquents dans les maisons individuelles mais beaucoup moins dans le collectif.

Ils sont en effet compliqués à mettre en œuvre dans les installations collectives.

Les réduits de soir ou de nuit sont également très fréquents dans les bureaux et les bâtiments d'enseignement.

Il n'y a pas de lien avéré entre l'existence ou l'absence de ces réduits et l'inertie du bâtiment ou le système de chauffage (cas des systèmes individuels).

Une démarche similaire a été menée en complément pour analyser les réduits de week-end. La fourniture de chauffage des différents jours de la semaine a été sommée par jour (distinctement du lundi au dimanche) pour obtenir le profil moyen hebdomadaire de la fourniture de chauffage. Cela permet de comparer la fourniture moyenne de chauffage pour chacun des jours de la semaine au besoin journalier moyen. L'écart relatif entre la fourniture de chauffage du jour et la fourniture journalière moyenne pour l'opération est alors l'indicateur de référence retenu : l'opération présente un réduit de week-end si la fourniture de chauffage moyenne des samedis et dimanches est plus faible que le besoin journalier moyen en chauffage, c'est-à-dire si l'écart relatif est négatif (il correspond alors à une diminution des besoins). À l'inverse, un écart relatif positif de 15 % signifie que la fourniture en chauffage pour ce jour-là est en moyenne 15 % supérieure à la fourniture en chauffage journalière moyenne pour cette opération.

Ce profil moyen hebdomadaire a pu être réalisé pour 9 bâtiments tertiaires du panel inoccupés le week-end, cet usage étant particulièrement intéressant car les réduits de week-end sont une source potentielle d'économie d'énergie. Ainsi des résultats ont pu être obtenus pour 3 écoles, 2 crèches et 4 bureaux.

Il en ressort que, pour la plupart des bureaux et des écoles, un réduit hebdomadaire existe (Illustrations 63 et 64). Cela se vérifie pour 3 bureaux et les 3 écoles, de façon plus marquée pour l'opération En.14.H1c.R.x par rapport aux écoles En.07.H1c.N.x et En.12.H1a.R.x. Une relance le lundi (écart relatif positif et important qui correspond à une augmentation notable de la fourniture en chauffage par rapport à la valeur journalière moyenne et par rapport aux écarts relatifs des autres jours) est alors observée.

Cela est moins tranché pour les autres usages de tertiaire : les 2 crèches par exemple (En.10.H2a.N.x et En.11.H3.N.x) ne semblent pas présenter de réduit hebdomadaire.

Illustration 63 – Profil hebdomadaire de fourniture de chauffage pour les crèches et les écoles

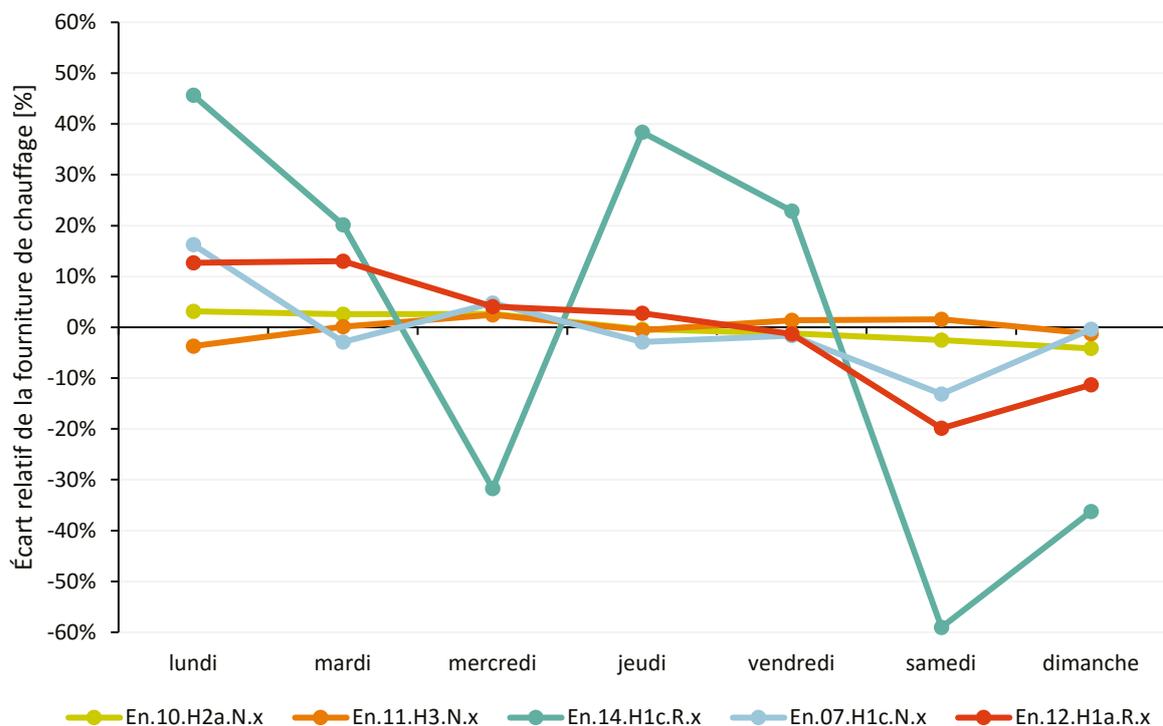
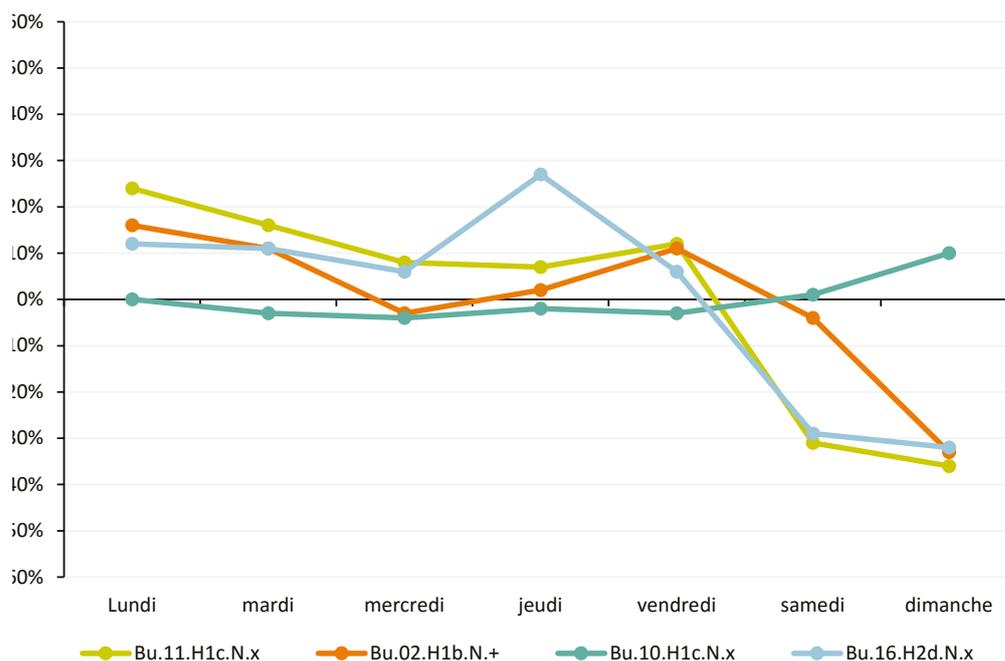


Illustration 64 – Profil hebdomadaire de fourniture de chauffage pour les bureaux



À retenir

Les réduits hebdomadaires ou réduits de week-end sont très fréquents pour les bureaux et les écoles. Ils sont suivis d'une relance le lundi.

Pour ce panel, cela paraît moins vrai pour les autres usages de tertiaire, comme les crèches.

L'augmentation du panel permettra de confirmer ces résultats et de dégager des tendances pour les autres bâtiments du secteur tertiaire.

3.2.3 Impact observé des réduits journaliers de chauffage sur les températures intérieures

Pour obtenir les températures de la phase de réduit journalier d'un local, il convient ensuite d'exploiter le profil horaire moyen de la température pratiquée dans le local. Celui-ci est calculé en raisonnant sur des moyennes horaires de la température intérieure du local, pour les jours occupés **et lorsqu'il y a fourniture de chauffage** en ne retenant que les valeurs représentatives (atteintes suffisamment de fois dans l'hiver).

En ne considérant dans ce profil que les périodes horaires pendant lesquelles le chauffage fonctionne et les moyennes de température sont plus faibles, et en s'arrêtant juste avant leur redressement (qui correspondrait à une relance), il est alors possible de déterminer la **température pratiquée pour le réduit de nuit**: elle est définie comme la **température moyenne du profil horaire obtenu, sur la période observée de réduit**.

Logiquement, en fonction du bâti et des systèmes, la période de réduit de nuit en température ainsi définie peut être décalée par rapport à la période de réduit de nuit en puissance.

Cette analyse a pu être menée sur les 27 bâtiments de l'échantillon pour lesquels l'existence d'un réduit de nuit avait déjà été étudiée (12 maisons individuelles dont 4 avec un arrêt de chauffage la nuit, 4 habitats collectifs, 6 tertiaires autres et 5 bureaux). Le terme « réduit » employé ci-après ne se rapportera qu'au réduit de nuit.

Les températures pratiquées en période de réduit et de non-réduit ont pu être obtenues, ainsi que la durée de chaque période. Ces éléments permettent de déterminer l'effet équivalent du réduit sur la température moyenne journalière qui est défini comme l'écart entre la température moyenne en période de non-réduit et la température moyenne pratiquée qui tient compte de la période de réduit et de non-réduit (elle est calculée en effectuant la moyenne des températures moyennes en période de non-réduit et de réduit, pondérée par la durée de ces deux périodes).

L'intérêt de cette valeur est qu'elle peut être comparée à l'effet du réduit conventionnel, présent dans les scénarios réglementaires, sur la température moyenne journalière en période de chauffage (partie suivante).

Illustration 65 – Effet d'un réduit de chauffage sur les températures intérieures moyennes journalières



Pour les bâtiments étudiés, l'effet du réduit de nuit sur les températures intérieures moyennes durant l'ensemble de l'hiver est globalement limité à -0,5 °C (effet maximum au global) et est corrélé au coefficient de relance de chauffage.

Dans le détail, l'impact du réduit de nuit sur la température intérieure moyenne, lorsqu'il existe, varie suivant les destinations d'usage :

- il est relativement faible pour les bureaux : moyenne de -0,17 °C sur la température de consigne en période de non-réduit. Cet écart sur la température est très proche de la variation moyenne de la température de consigne observée dans le logement collectif, bâtiments sans réduit de nuit.

La conséquence sur la consommation en chauffage d'une situation avec réduit de nuit par rapport à une configuration sans réduit sera donc minime. Pour rappel, il n'a été envisagé ici que les réduits de nuit. Ce résultat ne tient donc pas compte des réduits ou arrêts de fin de semaine, de fermeture d'établissement, ni des réduits asservis à l'occupation de chaque local ;

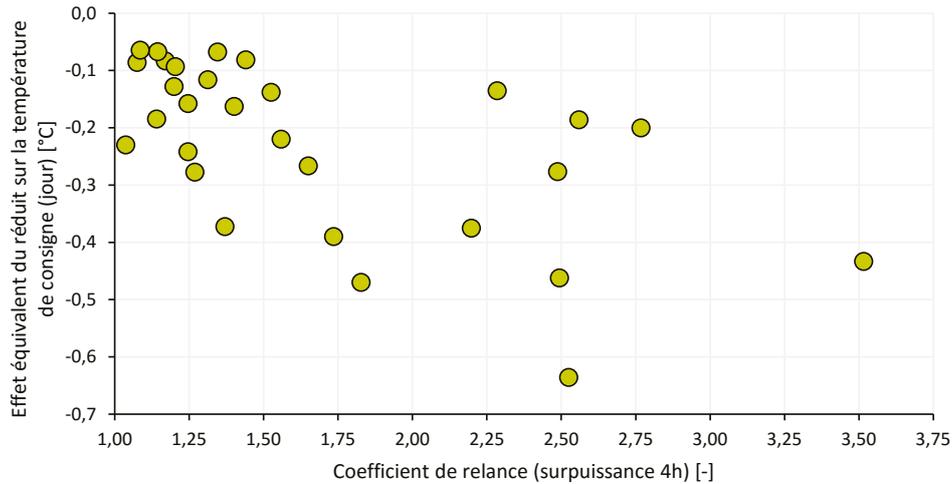
- il est plus important pour les maisons individuelles : moyenne de -0,35 °C sur la température de consigne en période de non-réduit. Ce réduit de nuit entraînera donc une légère diminution de la consommation en chauffage par rapport à une situation sans réduit.

Ces résultats dépendent notamment de la durée des périodes de réduit et de non-réduit.

Néanmoins ces niveaux d'impact sur les températures sont faibles et conduisent à des difficultés pour établir une limite entre « bâtiments avec réduit » et « bâtiments sans réduit ».

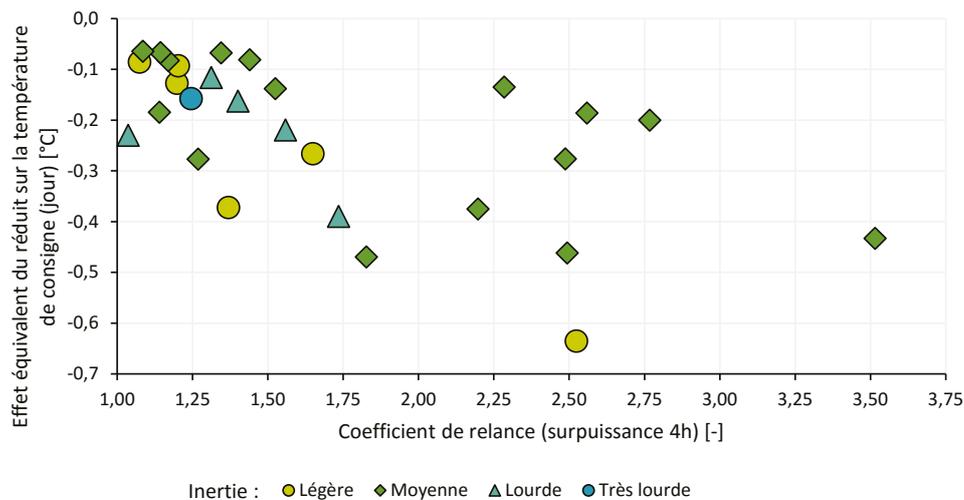
Dans le cadre de ce rapport, comme précisé dans les parties précédentes, la méthodologie retenue considère qu'il y a un réduit de nuit lorsque la relance de chauffage est supérieure à 25 %. Ainsi elle s'appuie plutôt sur l'évolution de la fourniture de chauffage que sur celle de la température.

Illustration 66 – Coefficient de relance et effet sur les températures intérieures



Existe-t-il ensuite un lien entre l'effet des réduits de chauffage sur la température intérieure et les caractéristiques techniques du bâtiment? Sur ce panel de bâtiments, l'analyse montre qu'il n'y a pas de lien entre inertie du bâtiment et effet des réduits de chauffage sur la température intérieure.

Illustration 67 – Effet du rédit selon la classe d'inertie



À retenir

L'effet du rédit de nuit sur les températures intérieures moyennes durant l'ensemble de l'hiver est globalement limité à $-0,5\text{ °C}$ (effet maximum). Cette valeur, plutôt faible, rend difficile la caractérisation des réduits de nuit via un critère sur l'évolution de la température. La méthode préférera une détermination via le profil de fourniture de chauffage.

Néanmoins, dans le détail, l'impact du rédit de nuit sur la température intérieure moyenne est plutôt :

- très faible pour les bureaux. Il est similaire à celui de bâtiments sans rédit de nuit. Le gain sur la consommation en chauffage d'une régulation avec rédit de nuit sera donc minime ;
- faible pour les maisons individuelles avec une moyenne de $-0,35\text{ °C}$. Un rédit de nuit entraînera donc une légère diminution de la consommation en chauffage.

Pour les cas observés, il n'y a pas de lien entre inertie du bâtiment et effet des réduits de nuit sur la température intérieure moyenne.

3.2.4 Comparaison avec la méthode Th-CE (RT 2005)

La méthode Th-CE s'appuie sur des conventions qui intègrent des réduits de température en fonction des usages :

- pour le tertiaire, réduit journalier tous les jours de semaine de 18 h à 8 h et réduit hebdomadaire le week-end;
- pour le logement, réduit journalier tous les jours de semaine de 10 h à 18 h mais aucun réduit le week-end.

La température conventionnelle minimale est alors de 16 °C pour des réduits de chauffage de moins de 48 h et de 7 °C s'ils dépassent 48 h.

Ainsi, pour calculer le besoin en chauffage, la méthode Th-CE considère que, en période de réduit, la **température intérieure diminue librement** (sans apport de chauffage), en fonction des déperditions du bâtiment, **tant que la température de réduit n'a pas été atteinte**. Dès qu'elle est atteinte, la relance a lieu avec un délai de déclenchement qui dépend du type de programmateur (fonctionnement d'un système parfait).

Pour établir une comparaison entre les grandeurs, en lien avec les résultats précédents et l'approche conventionnelle de la méthode Th-CE, l'effet des réduits conventionnels de la méthode Th-CE sur la température moyenne journalière a été calculé en travaillant avec le même panel de 27 bâtiments (pour rappel, le moteur Th-CE ne fournit pas les profils de température).

Voici les résultats obtenus :

- les effets des réduits de chauffage conventionnels sont importants pour les bureaux: en moyenne, la température intérieure journalière est abaissée de 1,13 °C. Les calculs intègrent ici aussi des réduits de fin de semaine, en cohérence avec les conventions de la méthode Th-CE, mais ceux-ci sont absents des résultats de la partie précédente ;
- les effets des réduits de chauffage conventionnels sont très faibles pour les maisons individuelles: en moyenne, la température intérieure journalière est abaissée de 0,21 °C.

Ces résultats sont donc très différents de ceux de l'exploitation précédente basée sur les mesures. Ainsi, le réduit mesuré et le réduit conventionnel n'auront pas les mêmes conséquences sur la consommation en chauffage.

Illustration 68 – Effet d'un réduit de chauffage sur les températures intérieures moyennes journalières : comparaison entre mesure et calcul conventionnel Th-CE

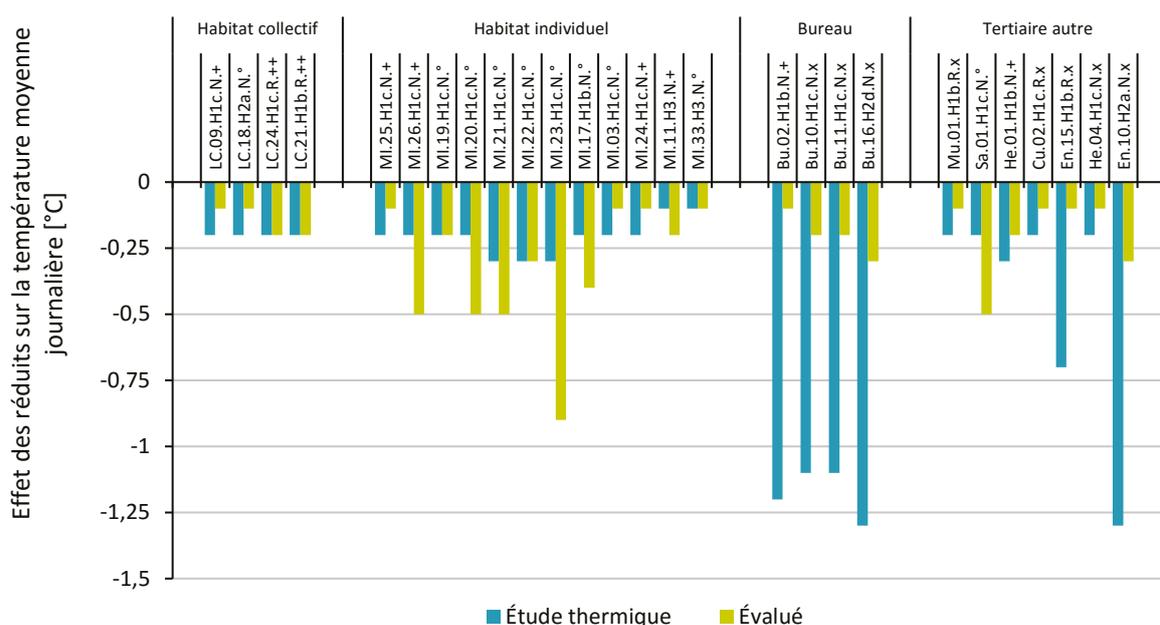
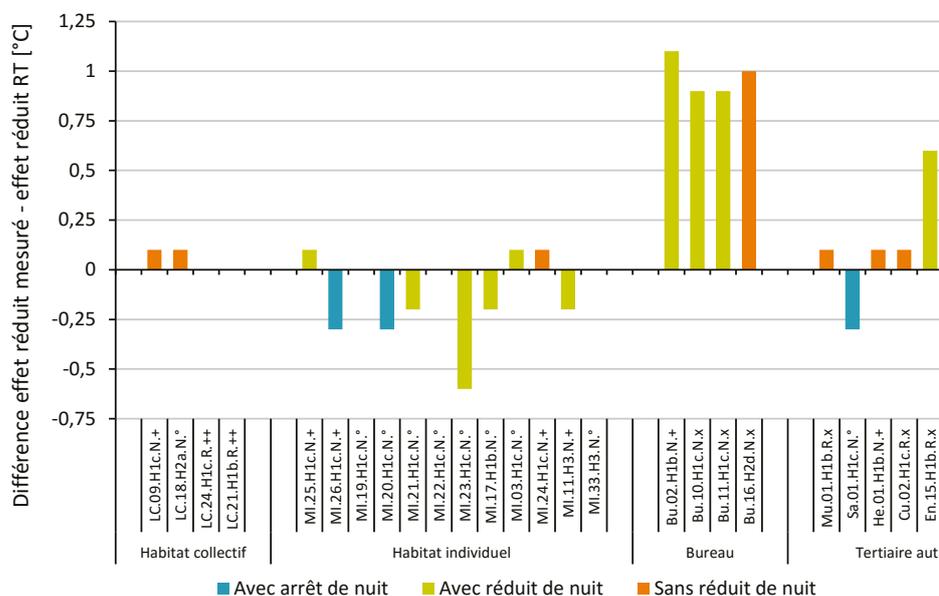


Illustration 69 – Comparaison de l'effet du réduct mesuré par rapport au réduct conventionnel sur la température journalière moyenne



Pour 5 opérations (2 habitats collectifs et 3 maisons individuelles), les **effets du réduct conventionnel et du réduct mesuré sont identiques** (différence nulle).

Pour les opérations pour lesquelles un réduct de nuit (ou l'arrêt du chauffage la nuit) est avéré :

- au global, **en habitat individuel, l'effet du réduct mesuré est plus important** que celui du réduct conventionnel et va dans le sens d'une température journalière moyenne plus faible.

Exemple pour l'opération MI.20.H1c.N.° : le réduct de nuit mesuré conduit à un équivalent de -0,5 °C sur la température moyenne journalière (contre -0,2 °C pour le réduct conventionnel de jour).

Pour ces bâtiments, l'écart maximal entre les deux réduits est de -0,6 °C pour une moyenne de -0,15 °C.

Ainsi, le réduct de nuit mesuré tend vers **une diminution des besoins en chauffage**. L'absence de réduct de nuit dans la convention réglementaire pour l'habitat n'est donc pas préjudiciable vis-à-vis du calcul des besoins en chauffage. Au contraire, la convention conduirait au plus à surestimer la consommation de ce poste ;

- au bilan, pour les opérations d'habitat avec un arrêt de chauffage la nuit, **l'effet de l'arrêt mesuré est plus important que celui du réduct conventionnel et que celui du réduct de nuit** sur la température journalière moyenne. Il va dans le sens d'une **diminution des besoins en chauffage plus prononcée** (moyenne de -0,2 °C avec un arrêt de nuit, contre -0,13 °C avec seulement un réduct pour les maisons individuelles). Ainsi un réduct de nuit suffisant (besoins en chauffage nuls la nuit) a un réel enjeu pour diminuer les besoins journaliers en chauffage ;
- à l'inverse, pour les bureaux, **l'effet du réduct mesuré est beaucoup plus faible. Le réduct conventionnel conduit à une diminution supplémentaire** moyenne de 1 °C de la température journalière moyenne.

Exemple pour l'opération Bu.02.H1b.N.+ : le réduct de nuit mesuré conduit à un équivalent de -0,1 °C sur la température moyenne journalière (contre -1,2 °C pour le réduct conventionnel).

Cependant, les effets des réduits de fin de semaine ne sont pas pris en compte dans l'analyse des réduits réels (étude avec les mesures uniquement des réduits journaliers). Un approfondissement méthodologique est à prévoir sur ce point pour la capitalisation 2017.

Pour les bâtiments tertiaires autres et le collectif, opérations qui ne présentent pas en pratique de réduct de nuit pour le panel, l'effet du réduct conventionnel a tendance à diminuer de 0,1 °C la température de consigne conventionnelle de la période de non-réduct, d'où également une source d'écart entre les besoins en chauffage mesurés et le résultat conventionnel.

À retenir

Les réduits de chauffage conventionnels (méthode Th-CE) et mesurés impactent de façon différente la température moyenne journalière intérieure des opérations. C'est donc une source d'écart sur la consommation en chauffage.

Pour l'habitat, le réduit de jour prévu dans la méthode Th-CE ne correspond pas à la réalité des températures observées. En maisons individuelles, lorsqu'un réduit de nuit (ou l'arrêt du chauffage la nuit) existe, il conduit à une baisse plus marquée de la température moyenne journalière. Ainsi, l'absence de réduit de nuit dans la méthode Th-CE peut présenter un impact sensible sur les consommations de chauffage.

Un arrêt de chauffage la nuit va dans le sens d'une diminution des besoins journaliers en chauffage et est plus impactant qu'un réduit de nuit (à relativiser en fonction des besoins de chauffage restants la nuit et donc du niveau de réduit de nuit pratiqué). La relance de chauffage du matin ne pénalise pas le bilan.

Pour les bureaux, lorsqu'un réduit de nuit existe, il conduit à une baisse moins marquée de la température moyenne journalière que le réduit de nuit décrit dans la méthode Th-CE.

3.3 Apports internes

Dans la méthode Th-CE, les apports internes sont calculés de manière conventionnelle par un apport horaire moyen par m² chauffé (surface utile ou surface habitable) pendant les périodes d'occupation (convention sur les horaires d'occupation déjà évoquée). Ce ratio, propre à la destination d'usage du bâtiment, comprend :

- les apports thermiques des occupants ;
- les apports générés par l'ensemble des équipements électriques hors éclairage.

Les apports internes dus à l'éclairage sont obtenus à partir du calcul de la consommation d'éclairage spécifique au bâtiment. Dans le cas de l'habitation, l'éclairage est pris en compte de manière forfaitaire.

Ce paragraphe s'intéresse ici aux apports internes hors installation d'éclairage et à leur impact sur la consommation de chauffage.

3.3.1 Les niveaux d'apports internes hors éclairage

Les apports internes sont évalués à partir d'une part des taux horaires d'occupation issus des enquêtes auprès des occupants, d'autre part de la mesure de la consommation électrique totale du volume chauffé (hors production de chaleur, en cas de chauffage électrique, et hors installation d'éclairage).

La comparaison des apports internes évalués (§ A.2.2) par rapport aux apports de l'étude thermique réglementaire est exposée ci-après.

Les figures suivantes présentent la variation des apports internes évalués par opération selon le type d'usage et ramenés aux heures d'occupation conventionnelle (soit par exemple une durée hebdomadaire de 128 h durant 52 semaines pour le logement). Les parts liées aux occupants et aux appareils électriques sont distinguées quand elles sont calculées. Les valeurs conventionnelles de la méthode Th-CE sont également indiquées sur la figure par type d'usage pour comparaison.

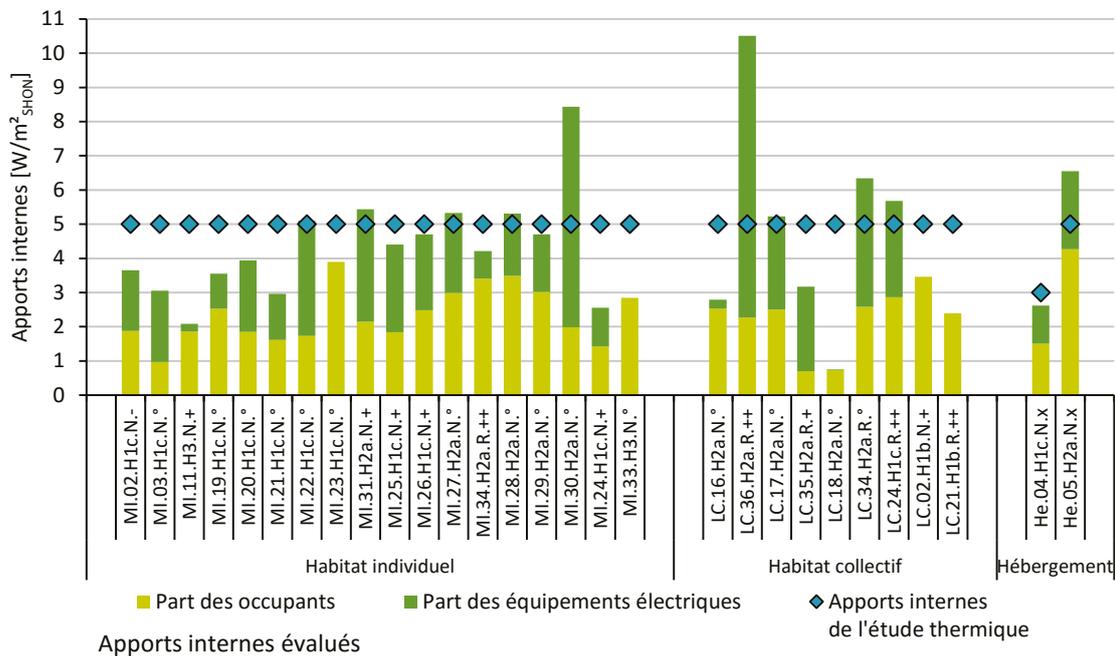
Cette étude a pu être menée pour 37 bâtiments de l'échantillon.

Pour les maisons individuelles (18 opérations), les logements collectifs (9 opérations), l'hébergement (un EPHAD et un gîte), le ratio est légèrement inférieur à la valeur conventionnelle de 5 W/m² (moyenne de 4,2 W/m² pour les maisons individuelles et 4,5 W/m² pour le collectif). La variabilité des apports internes est plus importante dans les logements collectifs (2 W/m² d'écart type) que dans les maisons individuelles (1 W/m²) (Illustration 70).

La part liée aux appareils électriques est la plus variable, car elle dépend non seulement de l'usage du bâtiment, mais aussi du taux d'équipement du ménage.

Par exemple, les opérations LC.17.H2a.N.° et LC.35.H2a.R.+ sont deux logements collectifs situés dans le même immeuble avec des apports internes dus à l'occupation proches, mais des apports internes dus aux équipements quasi nuls pour le second.

Illustration 70 – Apports internes hors éclairage en période d'occupation et leur valeur dans l'étude thermique réglementaire en résidentiel

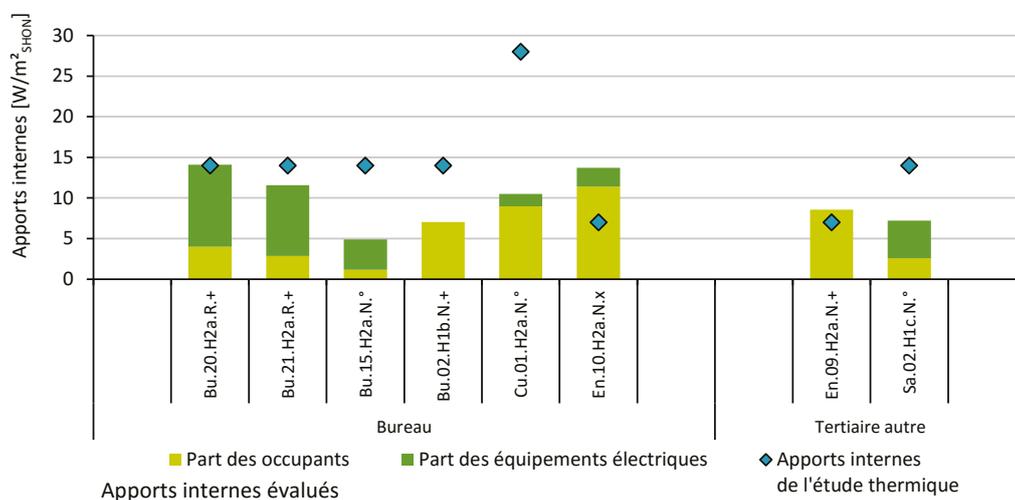


Pour les bureaux (4 opérations) et le bâtiment sanitaire sans hébergement (centre médical), les ratios affichent une moyenne de 9 W/m² donc beaucoup plus faible que la valeur conventionnelle de 14 W/m² (Illustration 71). Contrairement au cas de l'habitation, la part des appareils électriques est prépondérante dans les bâtiments de bureaux à cause du taux élevé d'équipements en informatique.

Pour les bâtiments d'enseignement, la valeur est haute pour une des deux opérations (Illustration 71). Cela s'explique par l'écart entre le nombre de semaines occupées en pratique, par rapport à la convention, pour le bâtiment concerné (occupé aussi en réalité ici pendant les vacances scolaires). L'autre valeur est proche de la valeur conventionnelle de 7 W/m². La part des occupants est prépondérante pour cet usage à cause de la forte densité d'occupation.

Enfin, en ce qui concerne la salle de spectacle, la valeur des apports internes diffère de la valeur réglementaire (28 W/m²), car la fréquentation réelle ne correspond pas à ce maximum (usage associatif et privé).

Illustration 71 – Apports internes hors éclairage en période d'occupation et leur valeur dans l'étude thermique réglementaire en tertiaire



À retenir

Pour les bâtiments d'habitation étudiés, les apports internes évalués sont légèrement inférieurs à 5 W/m² en période d'occupation (valeur dans le calcul réglementaire). La part liée aux appareils électriques est très variable en fonction de l'usage et du taux d'équipement du bâtiment.

Pour les bâtiments de bureaux étudiés, les apports internes apparaissent bien inférieurs à 14 W/m² et sont plutôt de l'ordre de 9 W/m². La part des appareils électriques est prépondérante pour cet usage.

3.3.2 Les périodes d'occupation

Le profil d'occupation est caractérisé par les deux paramètres suivants: le nombre de semaines d'occupation par an, ainsi que le nombre d'heures d'occupation par semaine.

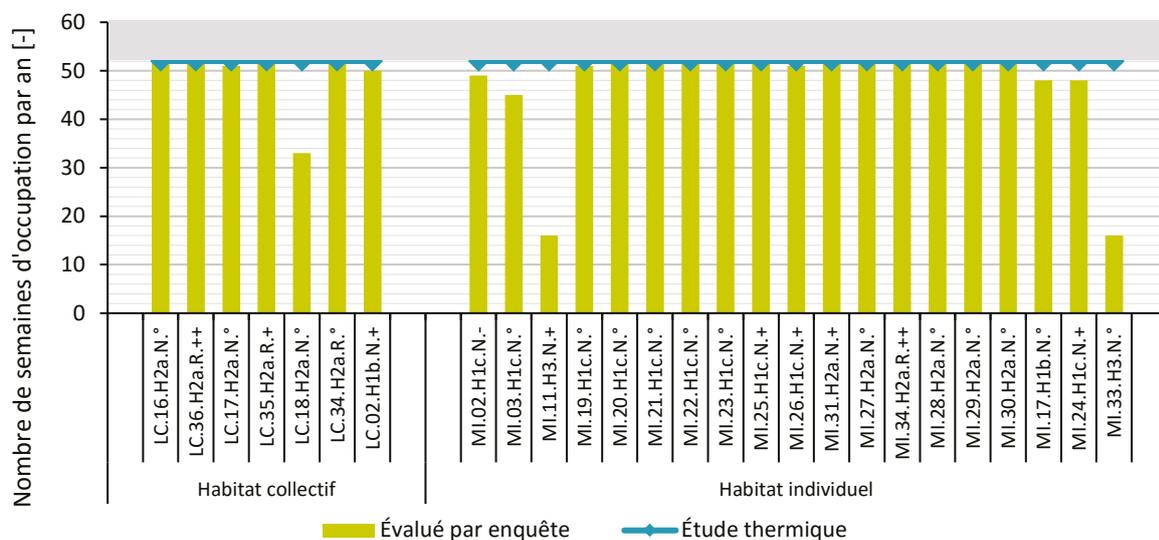
Ils sont évalués après entretien auprès des occupants des bâtiments via un questionnaire adapté. Ainsi ils reposent principalement sur leurs témoignages. Toute heure ou toute semaine durant laquelle les usagers déclarent qu'au moins une personne était présente dans les locaux est considérée comme en occupation. Les périodes de vacances sont assurément classées inoccupées. Ces données sont parfois recoupées, pour confirmation, avec les données de consommations d'ECS et d'éclairage.

Les graphiques suivants présentent le nombre de semaines d'occupation par an et le nombre d'heures d'occupation par semaine pour 35 opérations du panel, en regard des valeurs conventionnelles, différentes suivant les fonctions des bâtiments.

En résidentiel, les valeurs d'occupation conventionnelle du calcul réglementaire sont de 128 h par semaine (occupation uniquement du lundi au vendredi, 8 h par jour) sur 52 semaines par an.

Les témoignages des occupants sont très proches de ces valeurs (Illustration 72): seulement 3 bâtiments sur 26 ont un nombre de semaines d'occupation bien inférieur (de 16 à 33 semaines occupées). Il s'agit en réalité de résidences secondaires. Leurs conditions d'occupation seront donc bien éloignées de celles envisagées par le calcul réglementaire, et le recalcul est indispensable.

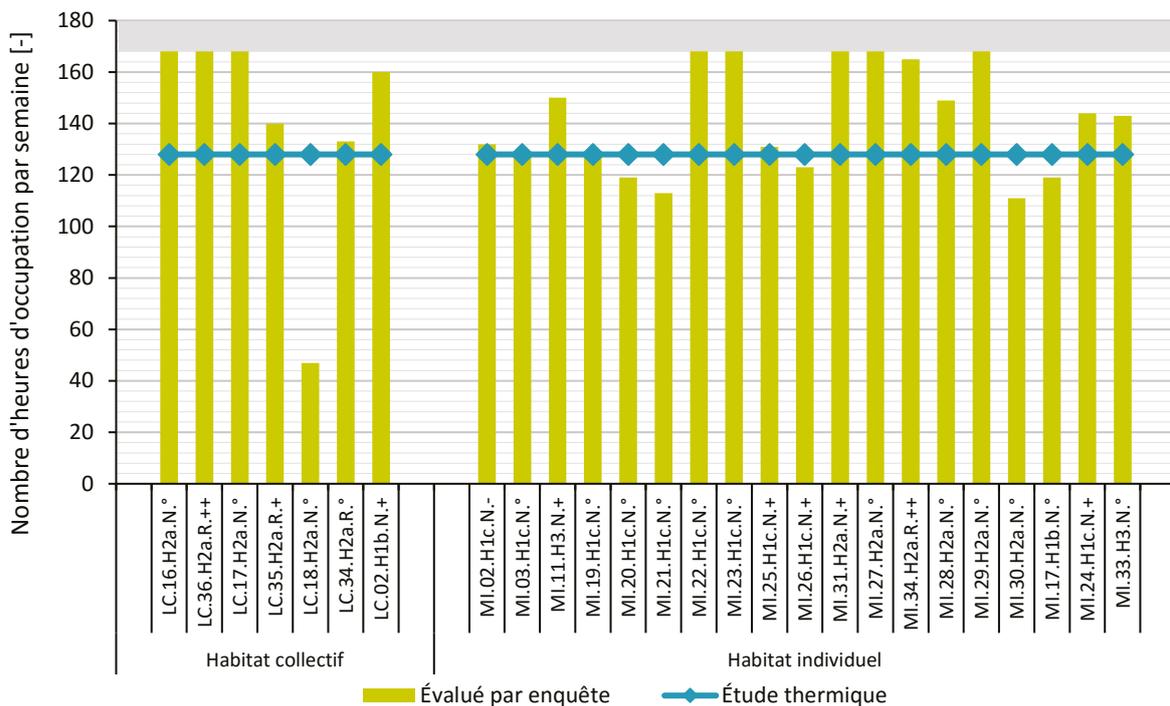
Illustration 72 – Profil annuel en résidentiel



Concernant l'occupation hebdomadaire, 6 des 26 bâtiments affichent des valeurs inférieures à la valeur du calcul réglementaire (Illustration 73). En majorité, **l'occupation déclarée est donc supérieure à la valeur réglementaire** : une moyenne de 144 h au lieu des 128 h du calcul réglementaire est observée, avec 30 % des opérations qui affichent une occupation continue (bilan à 168 h) et une opération occupée seulement le week-end (bilan à 47 h).

Cet enseignement doit être relativisé, car les données ont été obtenues en majorité suite à des entretiens d'occupants disponibles sur place, donc présents chez eux souvent ou, au moins, aux heures d'intervention des personnes réalisant le suivi des bâtiments. Leur profil d'occupation n'est donc pas forcément représentatif de celui de la population.

Illustration 73 – Profil hebdomadaire en résidentiel



Pour le tertiaire, les bâtiments de bureaux et le centre médical (5 opérations) **sont en général occupés en continu durant toute l'année** (Illustration 74), ce qui est en accord avec le scénario réglementaire pour ces fonctions (dans ce panel un seul bâtiment est fermé deux semaines). Le nombre d'heures de présence hebdomadaire est également **proche de la convention** de calcul avec une moyenne de presque 51 h (variant de 45 à 60 h) contre 50 h dans la méthode Th-CE (Illustration 75). L'échantillon étant encore très faible, il est peu représentatif. Le panel doit être élargi pour fiabiliser l'enseignement.

En ce qui concerne les bâtiments d'enseignement (2 opérations), les données recueillies sont en cohérence avec le scénario réglementaire pour une des deux opérations (Illustrations 74 et 75), mais sont éloignées pour l'autre opération. En effet, l'opération En.10.H2a.N.x est une crèche, ouverte en continu pendant l'année, avec des plages horaires importantes : occupation hebdomadaire évaluée à 60 h y compris pendant les vacances (soit 52 semaines) contre 50 h sur 36 semaines dans la convention du calcul réglementaire.

Pour les deux bâtiments culturels de l'échantillon (Illustrations 74 et 75), on observe une variabilité importante d'occupation : occupation hebdomadaire évaluée respectivement à 24 h et 77 h. Dans les deux cas, ces résultats sont très éloignés des 50 h d'occupation conventionnelle de la méthode Th-CE.

Illustration 74 – Profil annuel en tertiaire

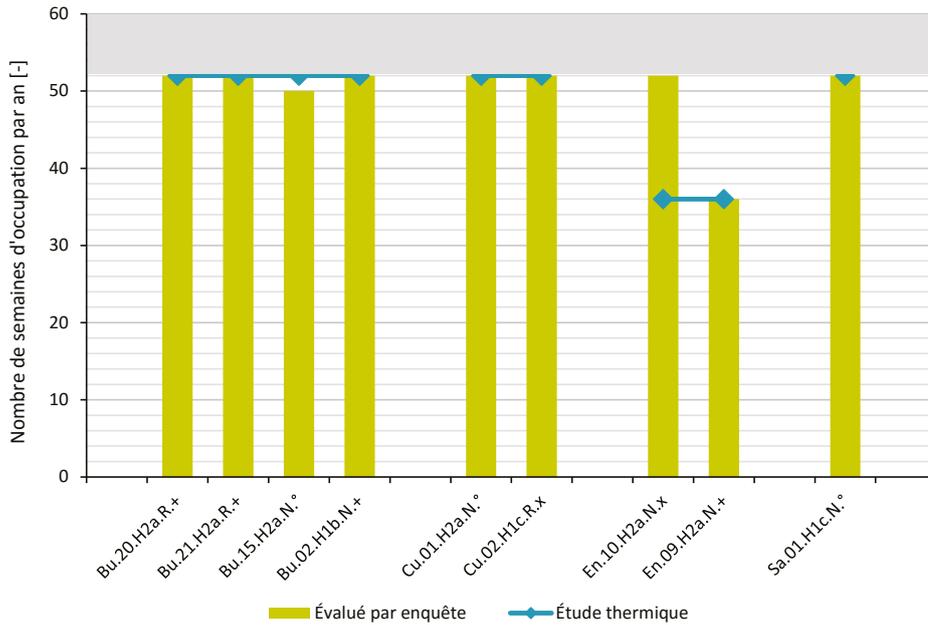
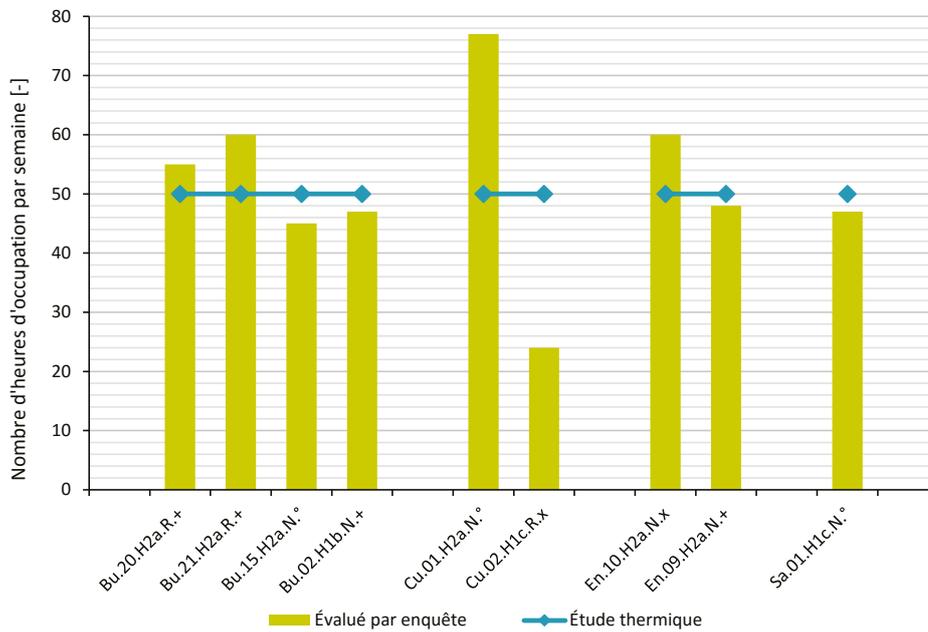


Illustration 75 – Profil hebdomadaire en tertiaire



À retenir

Pour les opérations de logement de l'échantillon, le nombre de semaines occupées par an est de 48 à 52 pour les habitations principales, donc proche du scénario RT. Concernant l'occupation hebdomadaire, le nombre d'heures moyen est supérieur au scénario de la RT (144 contre 128).

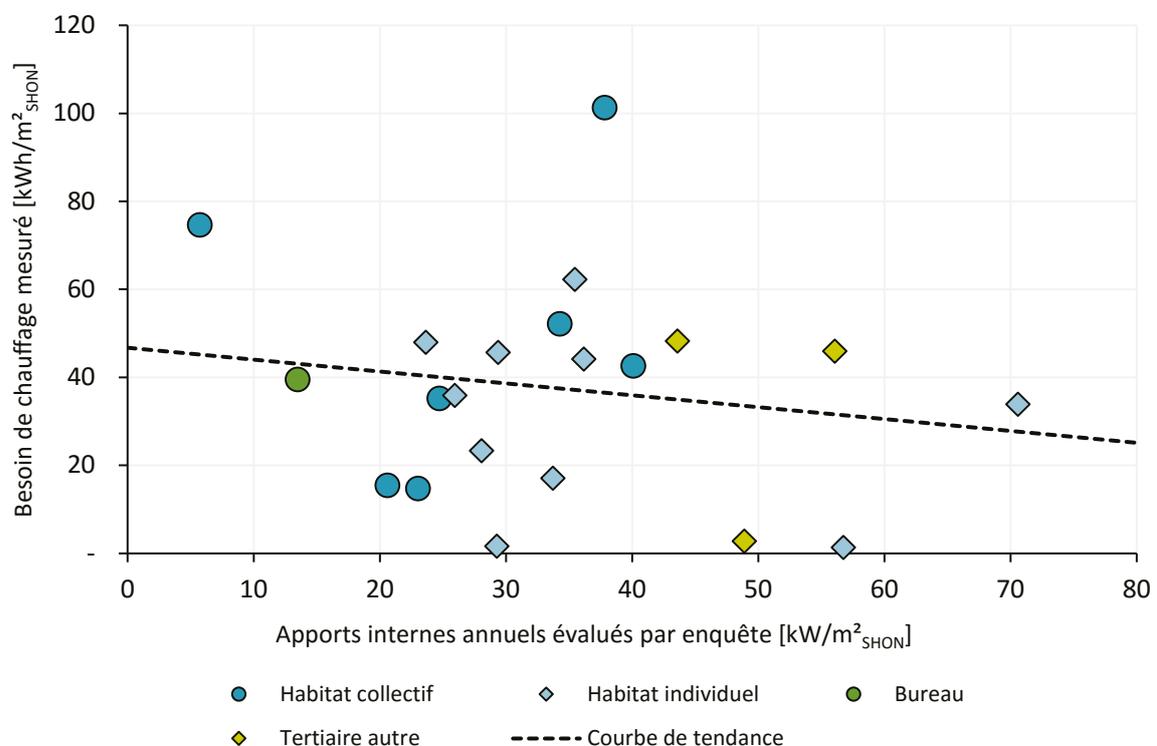
Pour le tertiaire, l'échantillon sur lequel on dispose de l'information est trop réduit pour généraliser.

3.3.3 Analyse des besoins de chauffage mesurés en fonction des apports internes

Dans l'illustration 76, les besoins de chauffage mesurés (en sortie de chaudière) sont confrontés aux apports internes globaux annuels : les apports internes horaires évalués sont sommés sur l'année en fonction des heures d'occupation déclarée.

Une **tendance à la baisse des besoins en fonction de l'augmentation des apports internes** est observée. Toutefois la corrélation est très faible et l'échantillon encore trop réduit pour fiabiliser cet enseignement. D'autres facteurs sont prépondérants, pour certains bâtiments, sur les besoins de chauffage, comme par exemple un climat favorable associé à une bonne conception de l'enveloppe pour les logements MI.29.H2a.N.° et MI.30.H2a.N.°.

Illustration 76 – Évolution des besoins de chauffage mesurés au regard des apports internes annuels totaux pour les opérations chauffées au gaz ou à effet joule



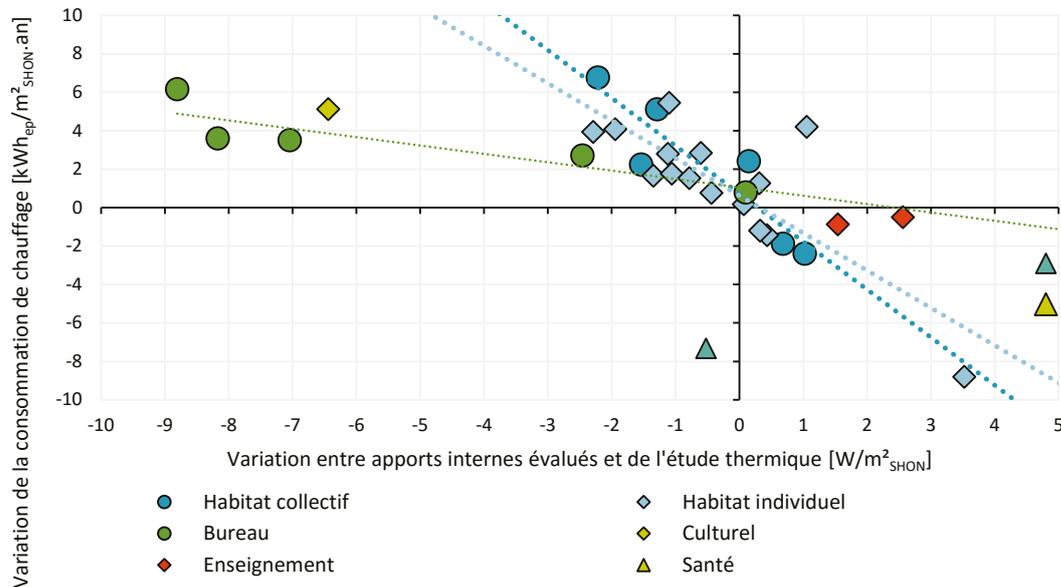
3.3.4 Impact calculé des apports internes constatés sur la consommation de chauffage

Impact calculé des apports internes constatés, hors éclairage

Ce paragraphe s'intéresse ici à l'impact des apports internes hors éclairage sur la consommation de chauffage de l'étude thermique réglementaire.

Les consommations de l'étude réglementaire ont pu être recalculées avec les apports internes constatés pour 33 opérations du panel.

Illustration 77 – Écarts de consommations de chauffage recalculées avec les apports internes évalués, hors éclairage, en fonction des écarts d'apports internes



Le graphique présente la variation des consommations de chauffage recalculées selon les apports internes mesurés. Logiquement, lorsque les apports internes constatés sont supérieurs aux apports internes de l'étude thermique réglementaire, la consommation de chauffage baisse et inversement. Les évolutions sont différentes en fonction de l'usage du bâtiment :

- pour les maisons individuelles (15 opérations), la variabilité des apports internes est comprise entre -3 et +6 W/m² avec une majorité d'opérations pour lesquelles les apports internes évalués sont inférieurs aux valeurs conventionnelles. On observe une variation proportionnelle de la consommation de chauffage par rapport à la variation des apports internes ($R^2 = 0,67$), soit une augmentation de la consommation de chauffage de 2,1 kWh_{ep}/m².an pour une diminution de 1 W/m² des apports internes ;
- pour les logements collectifs (6 opérations), la tendance est similaire au cas des maisons individuelles. Une diminution de 1 W/m² des apports internes entraînerait ainsi une augmentation de la consommation de chauffage de 2,7 kWh_{ep}/m².an ($R^2 = 0,84$) ;
- pour les bâtiments de bureaux (5 opérations), les apports internes observés sont toujours inférieurs aux valeurs conventionnelles avec une variabilité beaucoup plus importante que dans l'habitation (jusqu'à -9 W/m²). Toutefois, l'impact sur la consommation de chauffage est plus faible. Une diminution de 1 W/m² des apports internes n'entraînerait qu'une augmentation de la consommation de chauffage de 0,6 kWh_{ep}/m².an ($R^2 = 0,93$) ;
- pour les bâtiments tertiaires autres (7 opérations avec des usages variés), le panel est encore trop réduit pour conclure. Néanmoins, les deux bâtiments d'enseignement présentent des apports internes supérieurs à ceux de la convention avec un impact sur la consommation de chauffage très faible. La consommation de chauffage ne serait donc que très peu sensible aux apports internes pour cet usage.

À retenir

Dans les bâtiments à basse consommation, les apports internes représentent une part de plus en plus importante dans la couverture des besoins de chauffage.

La consommation de chauffage est très sensible à leur variation, sachant qu'ils sont assez variables d'un usage à l'autre :

- +2,1 kWh_{ep}/m².an pour une baisse de 1 W/m² sur les apports internes en maisons individuelles (à titre de référence, une personne émet environ 100 W) ;
- +2,7 kWh_{ep}/m².an pour une baisse de 1 W/m² sur les apports internes en logement collectif.

La variabilité est beaucoup plus importante dans les bureaux mais l'impact n'est seulement que de +0,6 kWh_{ep}/m².an par baisse unitaire des apports internes.

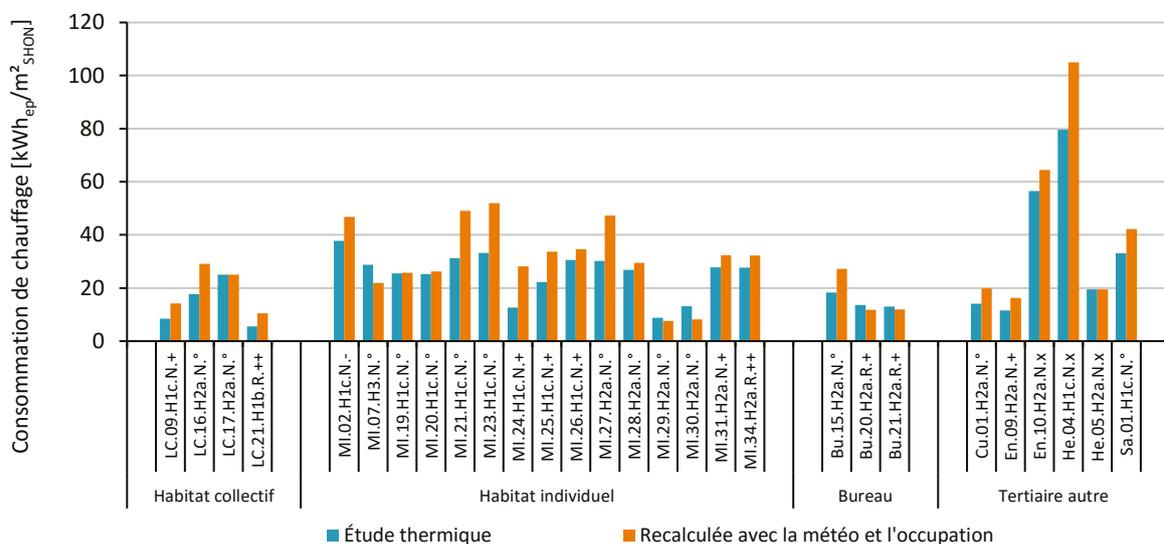
3.4 Combinaison des conditions météorologiques et d'occupation

Impact calculé de la prise en compte des conditions météorologiques et d'occupation

L'impact du jeu de paramètres combinés occupation, température de consigne et météo, sur la consommation de chauffage est analysé ici.

Le recalcul de la consommation de chauffage de l'étude thermique réglementaire avec la météo mesurée (pour au moins une année de suivi), l'occupation constatée et les températures de consigne pratiquées, a pu être effectué sur 28 opérations de l'échantillon.

Illustration 78 – Consommation de chauffage recalculée avec la météo et l'occupation (dont la température de consigne)



Au global, l'effet combiné de ces différents paramètres entraîne une **augmentation significative de la consommation en chauffage pour toutes les destinations d'usage et en particulier pour l'habitat, les bâtiments de santé et d'enseignement et le bâtiment d'hébergement**: en moyenne + 6 kWh_{ep}/m².an pour l'habitat, avec une moyenne plus élevée pour le collectif que pour l'individuel, + 6 kWh_{ep}/m².an pour l'enseignement et + 8,5 kWh_{ep}/m².an pour la santé contre + 4 kWh_{ep}/m².an pour le bureau, par rapport à la valeur de l'étude thermique réglementaire.

Le seul bâtiment à usage d'hébergement affiche une **augmentation très marquée** (+25 kWh_{ep}/m².an).

Cette moyenne plus faible pour les bureaux s'explique par le fait que, pour près de la moitié des opérations, la consommation de chauffage recalculée est inférieure à celle de l'étude thermique réglementaire. C'est aussi le cas pour certaines maisons individuelles mais pour des cas isolés.

L'augmentation du panel permet de préciser l'enseignement sur ce point.

Combiner ces paramètres permet de mettre en évidence le poids relatif de chacun. Ainsi, pour l'enseignement, le recalcul avec l'occupation seule (scénario d'occupation) entraînait une diminution de la consommation. **L'effet combiné de la météo et de la température de consigne pratiquée est donc prépondérant sur l'occupation seule.** C'est également le cas pour les bâtiments de santé et certains bâtiments d'habitation.

Cela se vérifie aussi pour les bâtiments de bureaux. Pour les cas où la consommation de chauffage recalculée est inférieure à celle de l'étude thermique réglementaire, le recalcul avec l'occupation seule conduisait à une augmentation de la consommation.

Les conventions utilisées pour le calcul de la consommation de chauffage dans l'étude thermique réglementaire conduisent donc en général à un résultat sur la consommation en chauffage plus faible que ce qui est constaté pour ces opérations.

En effet, pour les bureaux, le recalcul correspond à une augmentation, jusqu'à + 52 %, de la consommation en chauffage (moyenne 19 %). Elle va jusqu'à + 87 % en collectif (moyenne 60 %), + 122 % en habitat individuel (moyenne 22 %) et + 40 % pour les bâtiments de santé ou d'enseignement.

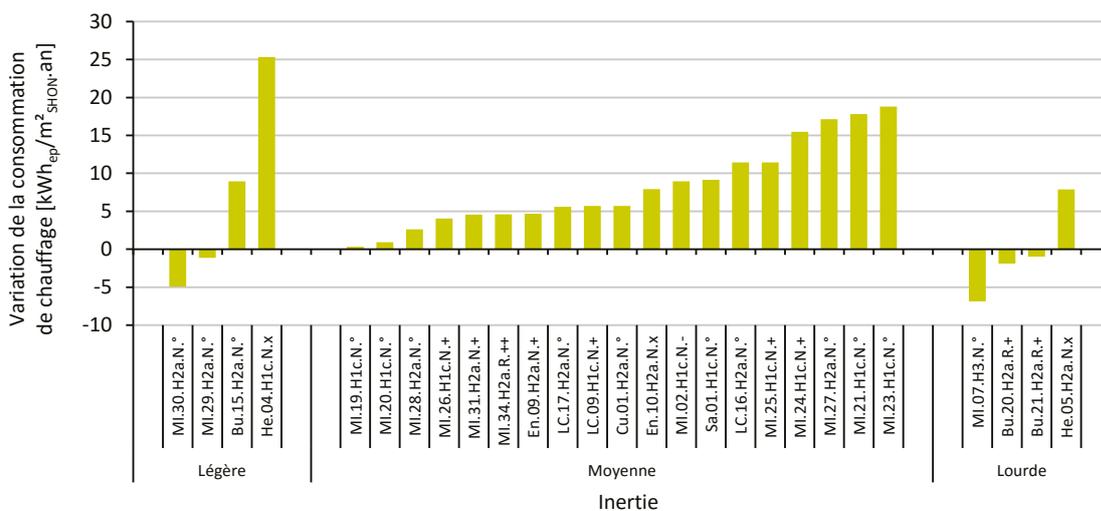
Pour un bureau en Bretagne :

Le recalcul correspond à une augmentation de 9 kWh_{ep}/m²/an soit près de 50 % de la consommation en chauffage.

Ces différences sur la consommation en chauffage sont bien le résultat de l'effet combiné de ces paramètres. La mise en relation des effets de ces paramètres sur la consommation avec le système de production de chauffage ou avec l'inertie du bâtiment n'a pas révélé de lien notable. Ainsi l'augmentation globale de la consommation lors de ce recalcul ne dépend pas du type d'énergie ni de la classe d'inertie du bâtiment.

L'analyse de l'inertie (Illustration 79) montre néanmoins que la surconsommation lors du recalcul tend à diminuer lorsque l'inertie du bâtiment augmente.

Illustration 79 – Consommation de chauffage recalculée avec la météo et l'occupation (dont la température de consigne) – Analyse en inertie



À retenir

Pour les bâtiments fortement isolés thermiquement :

- la prise en compte de l'occupation réelle (dont la température de consigne) et du climat mesuré entraîne une augmentation significative de la consommation en chauffage de l'étude thermique réglementaire pour toutes les destinations d'usage ;
- cette augmentation est particulièrement importante pour l'habitat, surtout en collectif, pour les bâtiments de santé et ceux d'enseignement ;
- parmi les paramètres de l'occupation et du climat, ce sont surtout les conventions sur la température de consigne et le climat qui entraînent une différence sur la consommation en chauffage ;
- l'effet sur les consommations des conditions d'occupation et du climat est moins marqué pour un bâtiment à forte inertie.

3.5 Besoin en eau chaude sanitaire

Dans la méthode Th-CE, les besoins en eau chaude sanitaire des occupants sont calculés, de manière conventionnelle, à partir d'un besoin moyen hebdomadaire en litres d'eau à 40 °C par m² chauffé (surface utile ou surface habitable) ou par nombre de lits, de repas, de chambres ou de douches et d'une clé de répartition horaire, ces paramètres dépendant de la destination d'usage et des caractéristiques du bâtiment. Le moteur calcule ensuite l'énergie nécessaire pour chauffer ce volume d'eau.

Ainsi les besoins en eau chaude sanitaire de l'étude thermique réglementaire (en kWh_{ef}/m².an) sont différents pour chaque bâtiment.

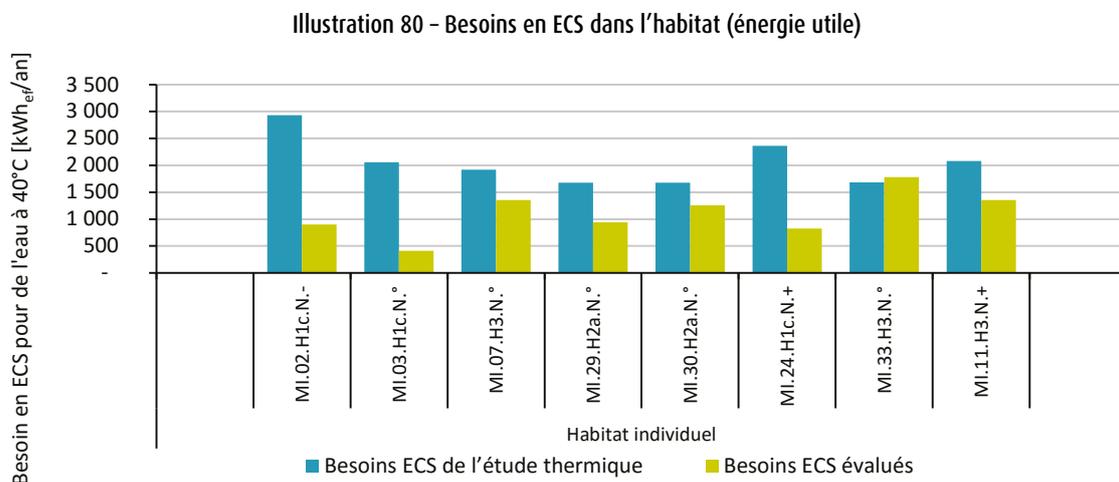
3.5.1 Les besoins en eau chaude sanitaire évalués

Les besoins en eau chaude sanitaire (ECS) de chaque bâtiment sont évalués à partir :

- soit du volume d'ECS produit pour l'occupation, de la température de préparation de l'ECS et de celle de l'eau froide de la localisation. On calcule ainsi le besoin énergétique pour chauffer l'eau dans l'installation réelle. Celui-ci est comparé au besoin énergétique pour chauffer l'eau à 40 °C ;
- soit directement de la quantité d'énergie thermique utilisée pour la production d'eau chaude qui a pu être mesurée lorsqu'un compteur a pu être installé. Celle-ci est comparée au besoin énergétique pour chauffer l'eau à 40 °C.

Si besoin, il est possible de revenir aux besoins en ECS évalués, en volume, en appliquant le coefficient de correction calculé à partir des besoins énergétiques en ECS réglementaires et évalués.

La comparaison des besoins en ECS évalués par rapport à ceux de l'étude thermique réglementaire est présentée dans l'illustration 80. Ces données ont pu être obtenues pour 8 maisons individuelles du panel.



Pour ces maisons, les **besoins en ECS évalués** sont la **plupart du temps inférieurs** aux besoins de l'étude thermique. L'écart par logement atteint entre 400 et 2 100 Wh_{EF} pour l'année. Ainsi la **convention de l'étude thermique surestime le besoin en ECS** pour cette destination d'usage.

À retenir

Pour les maisons individuelles, la convention de l'étude thermique surestime généralement le besoin en ECS.

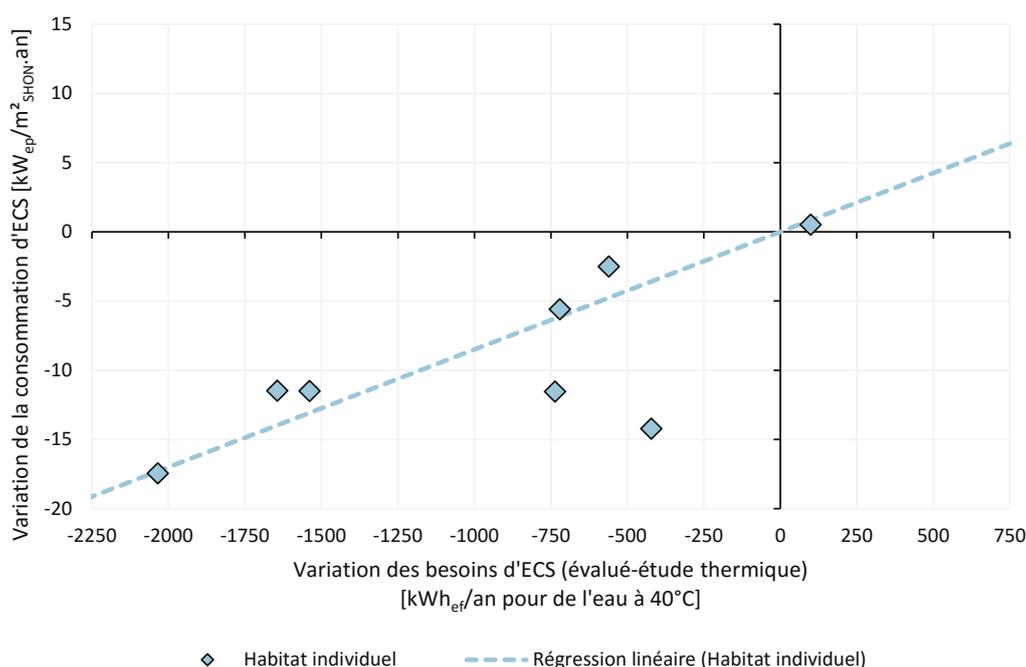
Ces écarts sur les besoins en ECS n'ont néanmoins qu'une influence restreinte sur la consommation du poste ECS.

3.5.2 Impact calculé des besoins en ECS évalués sur la consommation du poste ECS

L'impact des besoins en ECS sur la consommation du poste ECS de l'étude thermique réglementaire est étudié ici. Les consommations de l'étude réglementaire ont pu être recalculées pour 8 maisons individuelles du panel avec les besoins en ECS évalués.

L'illustration 81 présente la variation des consommations du poste ECS engendrée par l'introduction, dans l'étude thermique réglementaire, des besoins en ECS évalués (en remplacement de la valeur conventionnelle).

Illustration 81 - Évolution de la consommation ECS en fonction des besoins dans l'habitat



Logiquement, lorsque les besoins en ECS évalués sont supérieurs aux besoins en ECS de l'étude thermique, la consommation du poste ECS augmente, et inversement. Cette évolution est même relativement proportionnelle. Pour ces maisons individuelles, une variation des besoins annuels en ECS de 100 kWh entraîne une variation de la consommation recalculée du poste ECS de presque 1 kWh_{ep}/m².an. La production de l'ECS pour ces maisons est assurée en majorité par des systèmes solaires avec appoint électrique. Un appoint par chaudière à granulés (MI.07.H3.N.°) et un autre par chaudière gaz à condensation (MI.33.H3.N.°) complètent le panel.

Pour rappel, l'écart minimal, observé sur ce panel, entre les besoins en ECS évalués et ceux de l'étude thermique est de 400 kWh_{ef} pour les maisons individuelles.

Ainsi la consommation du poste ECS est relativement sensible aux besoins ECS pour les maisons.

À retenir

La consommation du poste ECS dans les maisons est relativement sensible à la variation des besoins ECS.

La tendance suivante a pu être mise en évidence: gain de 1 kWh_{ep}/m².an pour une diminution de 100 kWh/an des besoins ECS en maisons individuelles.



Performances énergétiques du bâti

L'essentiel

Les performances énergétiques réelles du bâti sont principalement portées par l'isolation thermique de l'enveloppe et son étanchéité à l'air.

L'isolation thermique du bâti retenue en phase de conception est très performante, avec un coefficient $U_{\text{bât}}$ de $0,36 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en moyenne pour le neuf et $0,47 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour la rénovation.

Le niveau d'isolation le plus élevé est généralement en plancher haut ($0,13 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Puis viennent les parois verticales opaques et les planchers bas sur terre-plein ($0,19 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), les planchers bas sur vide sanitaire ($0,23 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), et enfin les menuiseries vitrées ($1,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), lesquelles transmettent néanmoins les apports solaires.

La méthode d'évaluation du $U_{\text{bât}}$ mise en place par le Cerema, qui reste à consolider, laisserait apparaître un écart négatif, dans quasiment 90 % des cas, entre la performance réelle de l'enveloppe et sa valeur calculée dans l'étude thermique réglementaire. Sous réserve de conditions de mesures adéquates, cela s'expliquerait, notamment, par des imprécisions dans l'étude, des changements pendant le chantier et des défauts de mise en œuvre.

Globalement, la mise en œuvre de l'isolation est bien réalisée. Toutefois, les ponts thermiques ne sont pas assez souvent identifiés et traités.

L'étanchéité à l'air des enveloppes est globalement bien réalisée.

Les pertes énergétiques par infiltration d'air restent ainsi limitées. Les principaux défauts concernent la jonction menuiserie/encadrement, le passage des réseaux (électricité, chauffage et ventilation) et la jonction au niveau des coffres de volets roulants. Des efforts lors de la mise en œuvre peuvent encore être réalisés sur ces différents points.

4.1 Caractéristiques des enveloppes de l'échantillon

Dans l'échantillon de capitalisation 2016, on note que les systèmes constructifs diffèrent d'une fonction de bâtiment à une autre.

Pour l'habitat collectif (Illustration 82), le béton est le principal mode constructif (19 opérations pour le neuf et la rénovation). Les opérations d'habitat collectif, majoritairement construites en béton, peuvent présenter une forte inertie, lorsque isolées par l'extérieur (20 cas sur 37, voir illustration 85).

La construction en ossature bois est utilisée dans 7 opérations neuves et les différents types de maçonnerie se retrouvent principalement dans la rénovation (5 opérations avec de la maçonnerie ancienne et 2 opérations en parpaing). Une seule opération neuve a été construite en maçonnerie.

Illustration 82 – Répartition des modes constructifs (en nombre d'opérations) en habitat collectif

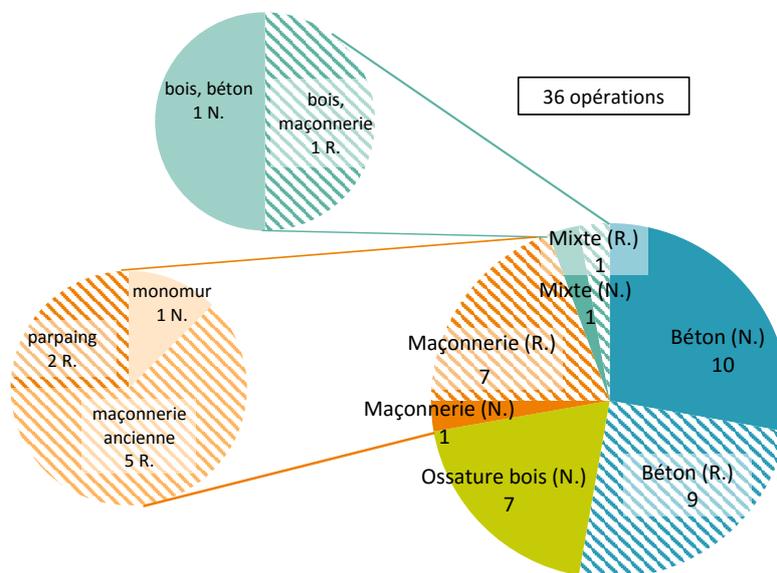
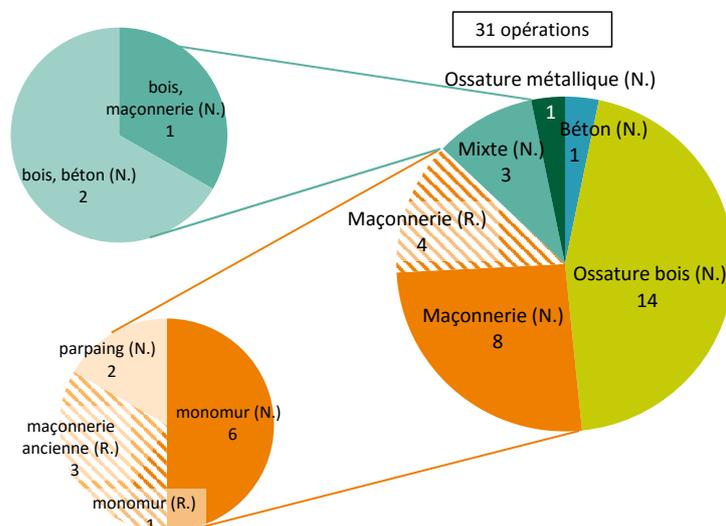


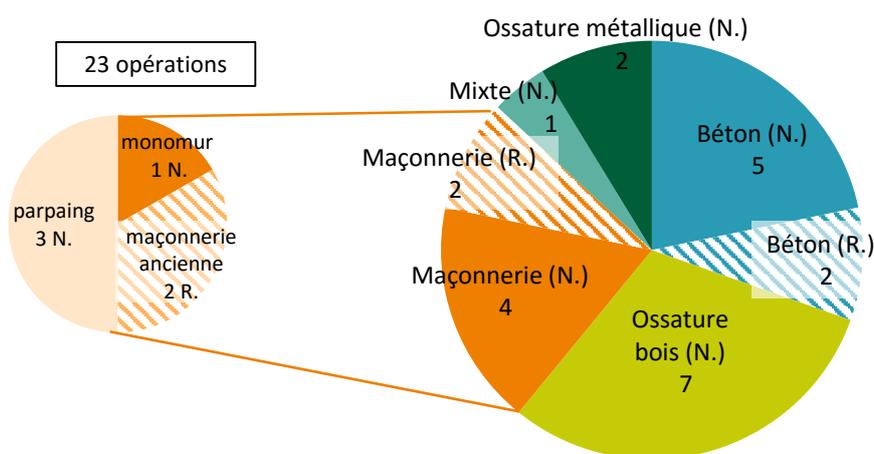
Illustration 83 – Répartition des modes constructifs (en nombre d'opérations) en maison individuelle



Pour les maisons individuelles (Illustration 83), seule une opération a été construite en béton. On trouve majoritairement dans l'échantillon des constructions en ossature bois (14 opérations neuves) et en maçonnerie : 8 opérations neuves en monomur et parpaing et 4 rénovations avec monomur ou maçonnerie ancienne. Cette répartition est une spécificité de l'échantillon PREBAT et n'est pas représentative des pratiques de construction actuelles, où seulement 9 % des constructions neuves de maisons individuelles et 28 % des extensions-surélévations sont en bois¹⁵.

Compte tenu des systèmes constructifs, les maisons individuelles présentent des inerties moyennes (monomur et parpaing) voire légères (construction bois).

Illustration 84 – Répartition des modes constructifs (en nombre d'opérations) pour les bâtiments de bureaux



Dans les bureaux, les modes constructifs sont quasiment équirépartis : 7 opérations en béton (principalement du neuf : 5 opérations), 7 opérations neuves en ossature bois, 6 opérations en maçonnerie (3 opérations neuves en parpaing, une opération neuve en monomur et 2 rénovations en maçonnerie ancienne), une opération neuve en mixte bois et béton, et 2 opérations neuves en ossature métallique. Dans la grande majorité, les bâtiments de bureaux présentent une inertie lourde.

Les opérations culturelles sont réalisées en bois et béton pour un bâtiment neuf et une rénovation, et en maçonnerie ancienne pour une rénovation. Ces enveloppes ont donc une inertie moyenne.

Les bâtiments de santé (3 EHPAD, 3 maisons médicales) sont construits en béton ou maçonnerie permettant d'avoir une forte inertie lorsque l'isolation est extérieure (2 cas sur 6, voir illustration 89).

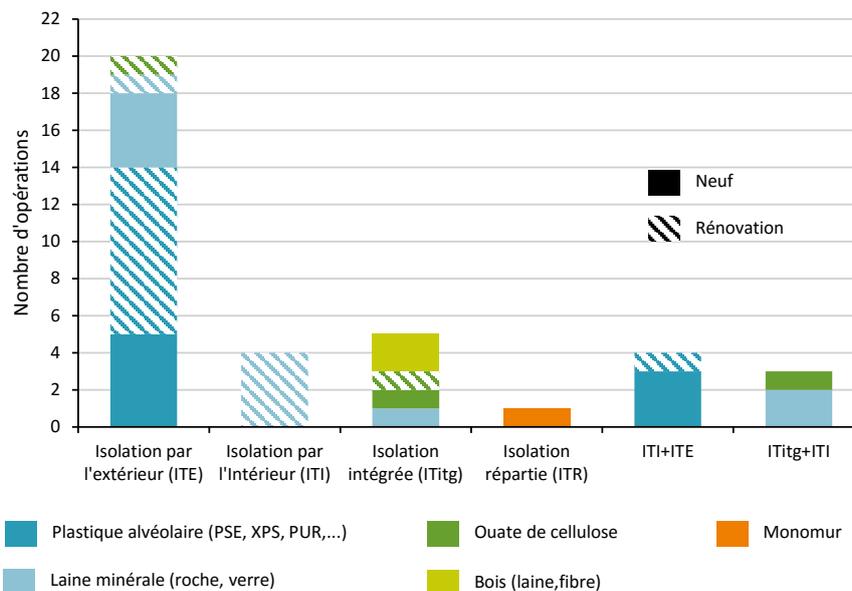
Les modes constructifs des opérations d'enseignement sont plus diversifiés : 5 opérations en béton, 4 opérations en ossature bois, 2 opérations en monomur, une en maçonnerie ancienne, 2 opérations en mixte bois et béton, et une opération en bois et maçonnerie.

4.1.1 L'isolation des parois verticales opaques

Le choix du mode d'isolation des parois verticales opaques est lié au mode constructif choisi. Ainsi l'habitat collectif, principalement construit en béton, est majoritairement isolé par l'extérieur (54 %), ce qui permet en première approche de réduire les déperditions par les ponts thermiques et de contribuer à l'inertie du bâtiment (Illustration 85). Ces opérations utilisent des isolants dits « traditionnels » : plastiques alvéolaires (polystyrène expansé ou extrudé) ou laines minérales (laine de verre, laine de roche).

15. Source : activité 2016 - Enquête nationale de la construction bois - Mai 2017 - France Bois Forêt et CODIFAB (comité professionnel de développement des industries françaises de l'ameublement et du bois)

Illustration 85 – Habitat collectif : répartition des modes d'isolation et types d'isolant des parois verticales opaques



Dans le cas des maisons individuelles, trois principes d'isolation ressortent de notre échantillon : l'isolation intégrée¹⁶ (31 %) utilisant des matériaux tels que les laines minérales ou les isolants bio-sourcés, l'isolation par l'intérieur (28 %) par des plastiques alvéolaires ou des laines minérales et l'isolation mixte¹⁷ (25 %).

L'ossature bois est associée, dans plusieurs cas de maisons individuelles ou de bâtiments avec une autre fonction, à des isolants bio-sourcés en vrac dont la pose est réalisée entre caissons. Les isolants mis en place dans ce cas sont la ouate de cellulose, la laine de bois et d'autres isolants bio-sourcés moins courants tels que la paille de blé ou la paille de riz.



Pour une maison individuelle en Languedoc-Roussillon :

« La procédure adoptée par le maître d'ouvrage est celle de l'autoconstruction en contractant avec des entreprises spécialisées (charpentier, menuiserie, vitrerie, électricité, plomberie) et en prenant des conseils dans les réseaux d'autoconstruction. [...] Ce type de chantier est long : il a débuté en 2007 et les finitions ne sont pas encore achevées en 2012. [...] Le maître d'ouvrage a privilégié des matériaux ayant un faible impact environnemental du fait de leur nature (bois, paille, terre crue) ou leur provenance proche (à l'exception des bottes de paille issues du Lauragais à 100 km environ). »

Illustration 86 – Autoconstruction d'une maison Individuelle en paille dans le Languedoc-Roussillon



16. L'isolation intégrée correspond à la pose d'un isolant entre ossature.
17. L'isolation mixte consiste à mettre deux couches d'isolants dans plusieurs positions par rapport à la paroi extérieure. On trouve principalement les combinaisons suivantes : ITI+ITE; Itg+ITI; ITR+ITE.

Illustration 87 – Maison Individuelle : répartition des modes d'isolation et types d'isolant des parois verticales opaques

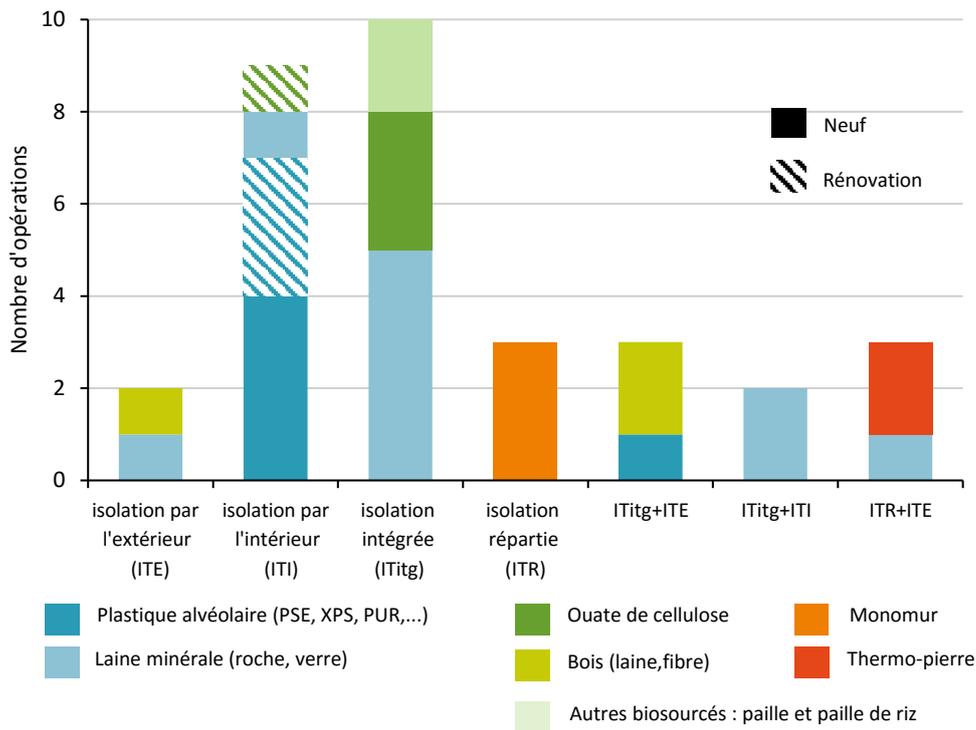


Illustration 88 – Bureau : répartition des modes d'isolation et types d'isolant des parois verticales opaques

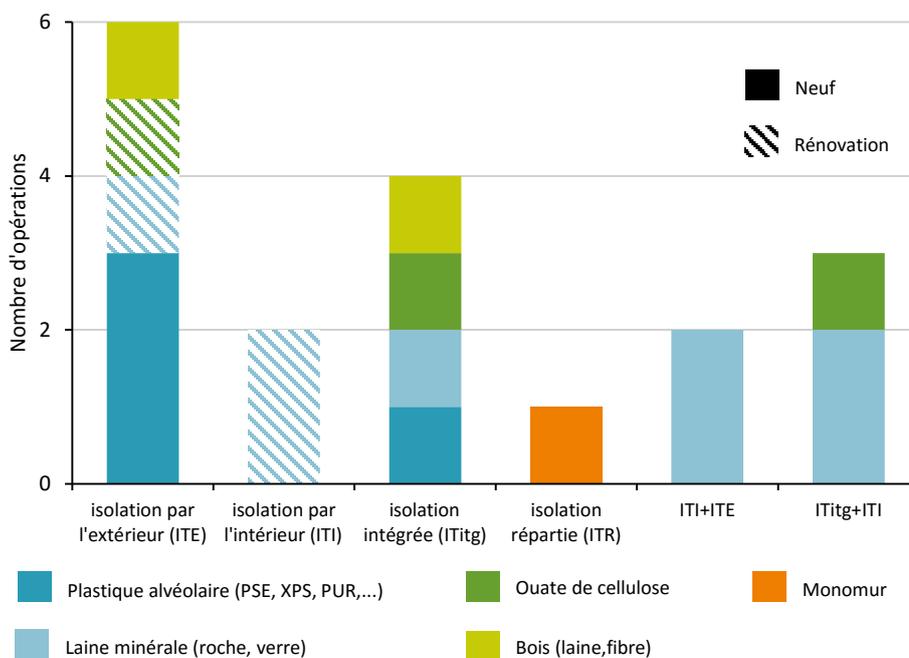
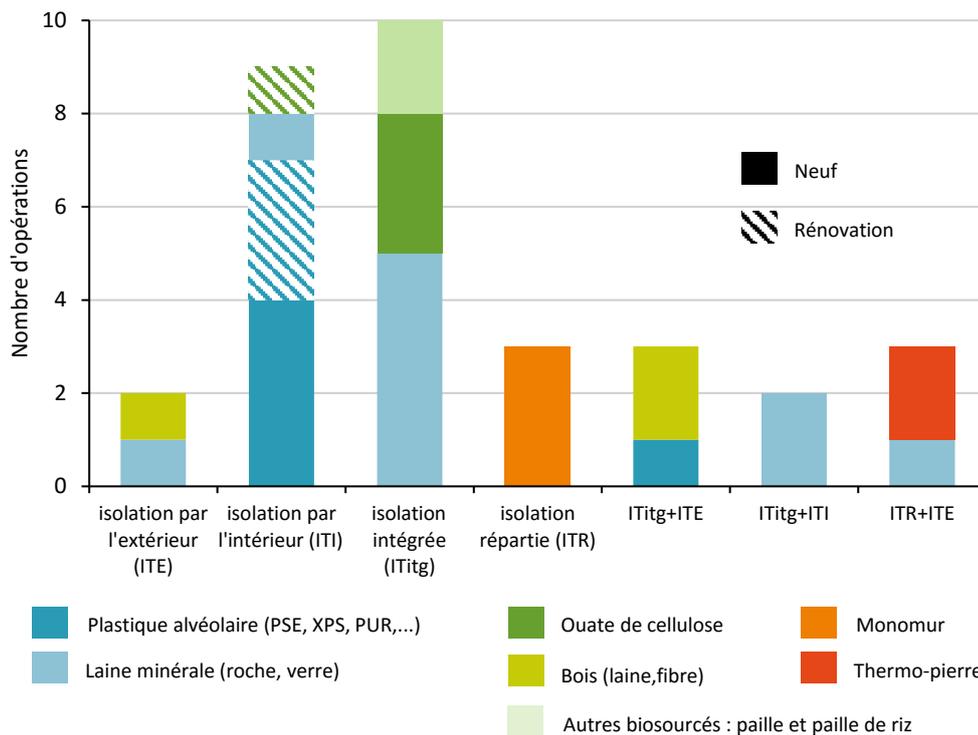


Illustration 89 – Autres tertiaires : répartition des modes d'isolation et types d'isolant des parois verticales opaques



Les opérations à fonction culturelle (Illustration 89) sont toutes les trois isolées par de la laine minérale. Les bâtiments d'enseignement sont principalement isolés par l'extérieur (5 opérations), entre ossature (3 opérations) et par isolation mixte (4 opérations). L'isolation répartie est assurée par de la brique monomur.

Dans les bureaux (Illustration 88), l'isolation des parois verticales opaques est majoritairement réalisée en isolation par l'extérieur (33 %), en isolation mixte (28 %) et en isolation intégrée (11 %). 2 opérations de rénovation sont isolées par l'intérieur.

Sur les 33 opérations de rénovation de l'échantillon, 15 opérations ont été construites en pierre ou brique (maçonnerie ancienne). Lors de leur rénovation, parmi ces 15 opérations, 14 ont été isolées par l'intérieur avec de la laine minérale (8 opérations), des plastiques alvéolaires (3 opérations) ou de la ouate de cellulose (3 opérations).



La rénovation de murs anciens nécessite de porter une attention aux transferts d'humidité et en particulier pour les isolations par l'intérieur. Une ventilation mécanique doit permettre l'évacuation de l'humidité générée dans le bâtiment. Les ponts thermiques, lieux propices à la condensation et au développement de moisissures, doivent être traités au maximum. La barrière d'étanchéité à l'air côté intérieur doit empêcher l'air humide de traverser la paroi pour éviter la condensation derrière l'isolant. Enfin les remontées capillaires, les transferts d'humidité par une pluie battante ou toute autre sollicitation extérieure doivent être pris en compte et limités dans la mesure du possible.

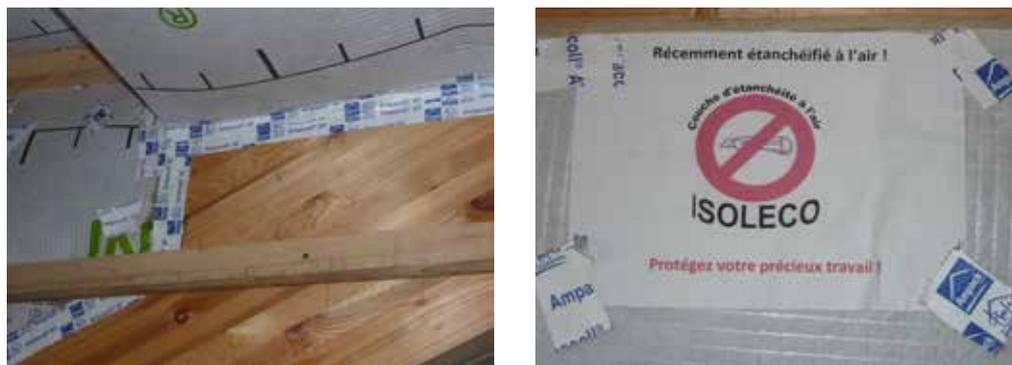
Sur les opérations PREBAT, aucun problème lié à l'humidité n'a été remonté à ce jour, mais plusieurs opérations pourraient être sensibles à ce genre de problème.



Pour un bâtiment à utilisations multiples (commerce, santé, logement) en Lorraine :

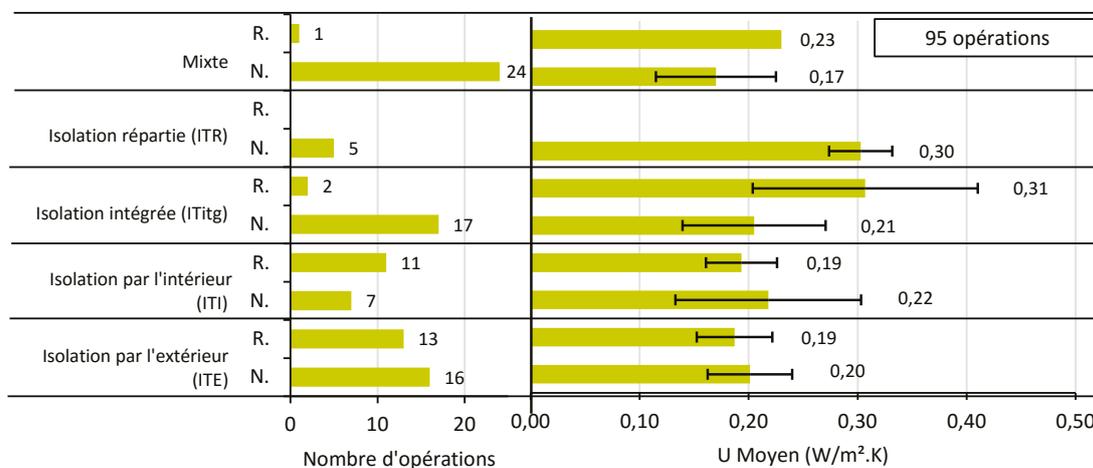
« Pour la rénovation du bâtiment en pierre, l'isolation des parois verticales opaques s'est faite par l'intérieur avec de la ouate de cellulose et de la laine de bois. Pour limiter les risques de dégradation par l'humidité, une membrane hygro-variable a été mise en place avec une précaution toute particulière. De plus, une ventilation mécanique a été installée. »

Illustration 90 - Illustration du soin pris pour la mis en place de la membrane hygro-variable



Les coefficients de déperdition thermique U, présentés dans la suite, sont calculés selon les règles Th-Bât.

Illustration 91 - Performance thermique des parois verticales opaques¹⁸



En ce qui concerne la performance, le coefficient de déperdition thermique (U) des parois verticales est similaire, environ 0,20 W/m².K, que l'isolation ait été réalisée par l'extérieur, par l'intérieur ou en isolation répartie. En isolation mixte, le coefficient de déperdition thermique moyen est plus faible, 0,17 W/m².K, mais aussi plus variable. L'isolation mixte¹⁹ permet d'augmenter l'épaisseur totale d'isolant : 25 cm en moyenne pour l'isolation mixte contre 18 cm en moyenne pour les isolations simples (ITE, ITI, Itg). L'isolation répartie en monomur est moins performante avec un U moyen à 0,30 W/m².K, malgré une épaisseur du mur importante de 42 cm. La plupart des opérations isolées en monomur se situent dans le sud de la France en zone H3 où les besoins en chaud sont plus faibles. La performance des parois verticales est la même en neuf et en rénovation²⁰.

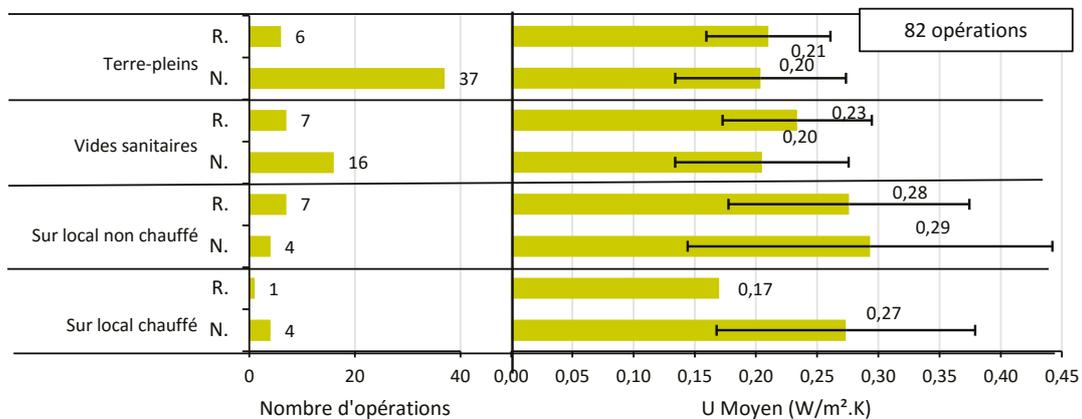
18. Les barres noires correspondent aux écarts types.

19. ITE + ITI ou Itg + ITE ou ITR + ITI...

20. La rénovation en isolation mixte et les deux rénovations en isolation intégrée (entre ossature) ne sont pas prises en compte dans cette affirmation.

4.1.2 Planchers bas

Illustration 92 – Performance thermique des planchers bas



L'échantillon présente une légère majorité de bâtiments sur terre-plein (52 %). Les planchers sur locaux chauffés ou non chauffés se retrouvent dans l'habitat collectif. En maison individuelle, les planchers bas sont en majorité sur terre-plein (14 opérations), 10 opérations sont sur vide-sanitaire et 4 sur local non chauffé.

La plupart des planchers bas sont isolés par des plastiques alvéolaires (plus 75 %), mais on trouve néanmoins 13 planchers isolés par des isolants bio-sourcés: ouate de cellulose (5 opérations), bois (4 opérations), liège (3 opérations) et paille de riz (une opération), ainsi que 8 planchers bas isolés avec de la laine minérale.

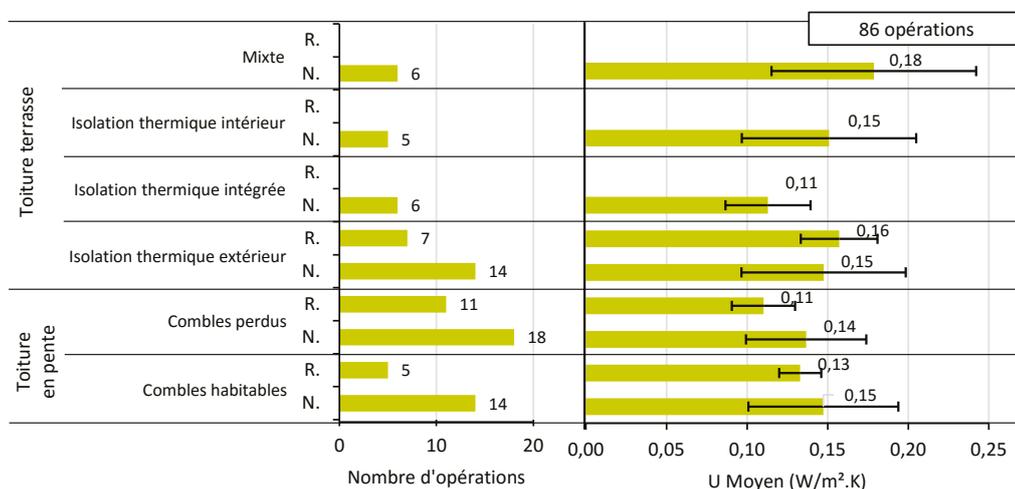
Au sein de l'échantillon étudié, le coefficient de déperdition thermique varie de 0,13 W/m².K à 0,39 W/m².K. La performance des planchers sur terre-plein ou vide sanitaire (0,2 W/m².K) est légèrement meilleure que celle des planchers sur local chauffé ou non (0,25 W/m².K et 0,28 W/m².K respectivement). Aucune différence notable n'est observée entre les coefficients de déperdition moyens des opérations neuves et de rénovation.

4.1.3 Planchers hauts

20 % des bâtiments ont une toiture terrasse végétalisée. Ces toitures terrasses végétalisées sont principalement mises en œuvre sur des bâtiments publics de santé, de culture, ou d'enseignement (10 opérations).

Un peu plus de la moitié des bâtiments de l'échantillon est pourvue d'une toiture en pente (55 %) et l'autre moitié de toitures terrasses (45 %). Les toitures en pente sont principalement mises en œuvre dans les bâtiments résidentiels (80 % des toitures en pente). 70 % des opérations tertiaires présentent des toitures terrasses.

Illustration 93 – Performance thermique des planchers hauts



La majorité des toitures terrasses sont isolées par l'extérieur (21 opérations) avec des plastiques alvéolaires (14 opérations) ou des laines minérales (7 opérations). Le coefficient de déperdition thermique moyen des toitures terrasses est de $0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. La performance thermique est quasiment équivalente entre les différents types d'isolation des toitures terrasses sauf pour l'isolation intégrée qui est plus efficace ($U = 0,11 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Pour les toitures en pente, 94 % des habitats collectifs sont isolés en comble perdu alors que dans 60 % des maisons individuelles les combles sont habitables et donc isolés sous pentes. Les combles perdus sont isolés par de la laine minérale en majorité (21 opérations) et de la ouate de cellulose (6 opérations). Les combles habitables sont isolés par de la laine minérale (7 opérations), de la ouate de cellulose (7 opérations) ou de la laine de bois (3 opérations), et pour une opération par de la paille. L'épaisseur moyenne d'isolant est quasiment équivalente entre les combles perdus (33 cm) et les combles habitables (31 cm). Ces épaisseurs d'isolant permettent d'obtenir de très bonnes performances thermiques, respectivement $U_{\text{moyen}} = 0,13 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en comble perdu et $U_{\text{moyen}} = 0,14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en comble habitable.

Les coefficients de déperdition thermique des planchers hauts sont similaires pour les opérations neuves et de rénovation.

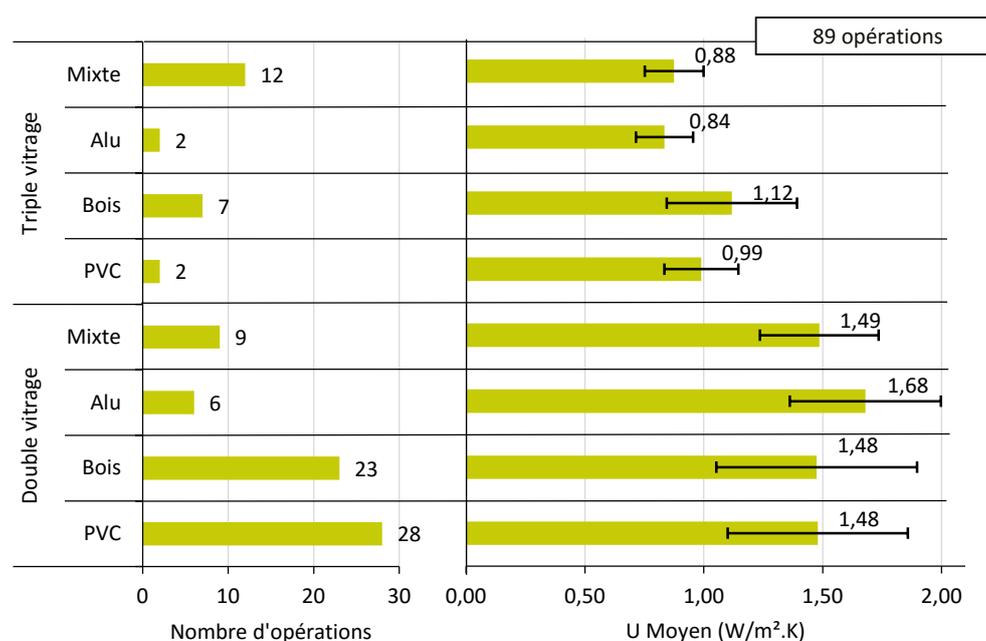
4.1.4 Baies vitrées

Performances

75 % des opérations sont équipées de menuiseries à double vitrage, et 25 % de menuiseries à triple vitrage. Ces dernières sont principalement installées dans les zones climatiques les plus froides (H1 et H2). Les menuiseries à triple vitrage ont des châssis bois ou des châssis mixtes (principalement bois et acier).

Comme attendu, la performance des menuiseries à triple vitrage est meilleure que dans le cas du double vitrage : en moyenne $U_w = 1,49 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour le double vitrage contre $U_w = 0,97 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour le triple vitrage. En triple vitrage, la performance des menuiseries à châssis mixte est meilleure que pour les châssis bois : $0,88 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en moyenne contre $1,12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. En double vitrage, la performance est similaire quel que soit le type de châssis ($1,49 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) sauf pour les châssis en aluminium qui sont moins performants : $U_w = 1,68 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en moyenne.

Illustration 94 - Performance thermique des menuiseries



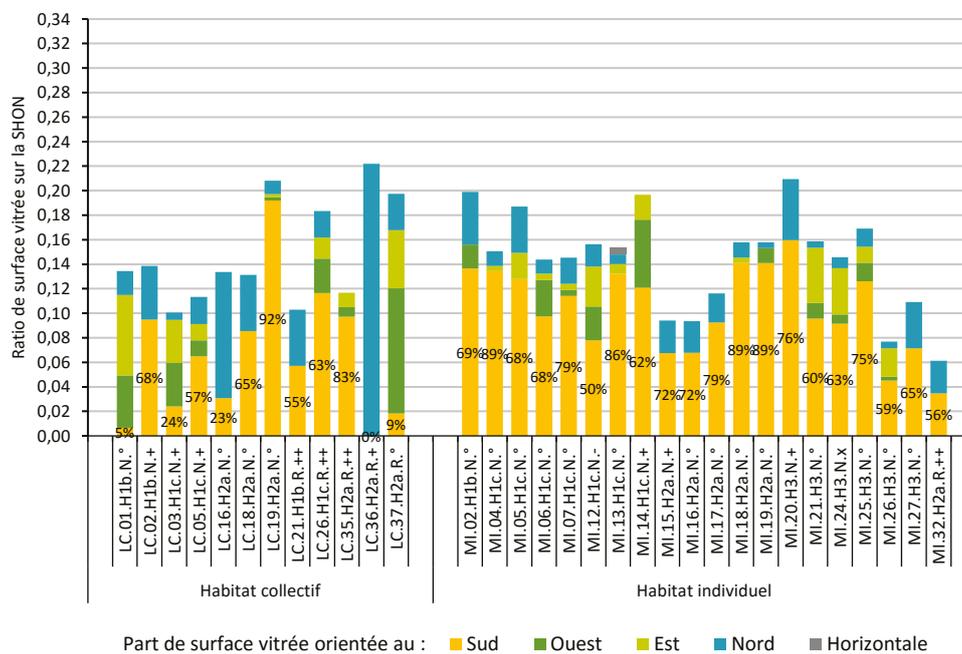
Ratio de surface vitrée

La capacité de l'enveloppe à réduire les besoins de chauffage n'est pas seulement liée à son isolation (parois opaques et vitrages confondus), mais également à sa capacité à capter les apports solaires. La quantité d'apports solaires dépend de la surface et de l'orientation de la baie vitrée.

Par exemple, pour le climat parisien, 1 m² de double vitrage orienté au sud a un impact positif sur les besoins de chaud (apports solaires supérieurs aux déperditions), à condition que les volets soient baissés la nuit et que les rayons solaires ne soient pas bloqués par un masque. Inversement, en été, il s'agira de limiter les apports solaires pour réduire les surchauffes (cela peut aussi passer par l'utilisation de protections solaires adaptées).

L'illustration 98 pour le résidentiel, et l'illustration 96 pour le tertiaire montrent le ratio de surface de baie vitrée par rapport à la SHON du bâtiment en fonction de l'orientation pour notre échantillon.

Illustration 95 – Ratio de surface vitrée par rapport à la SHON en habitat



On constate effectivement une prépondérance de surface vitrée au sud, par rapport aux autres orientations pour toutes les maisons individuelles, le ratio variant de 56 % à 89 %. En collectif, les contraintes d'implantation sur site étant plus fortes, le sud est prédominant par rapport aux autres orientations pour environ la moitié des opérations (7 opérations sur 12).

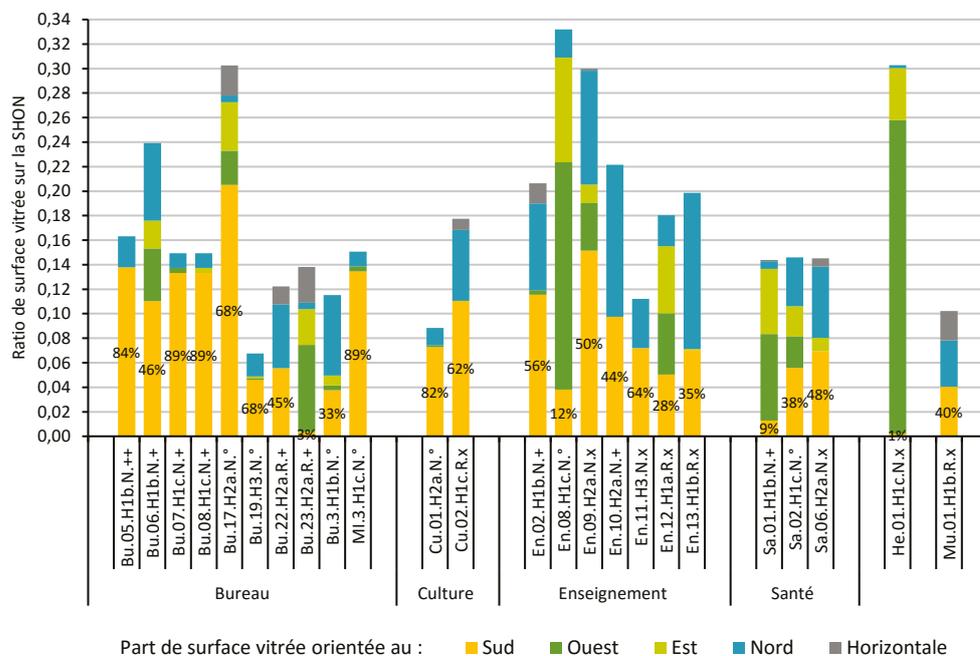
En zone H3, sur notre échantillon de 6 opérations, nous avons aussi les surfaces vitrées au sud qui sont prépondérantes (63 à 76 %). Le ratio de surface vitrée à l'ouest est toutefois plus faible que sur le reste de l'échantillon.

Pour limiter les surchauffes (ou les besoins de froid), les baies vitrées au sud peuvent être protégées par des casquettes horizontales²¹, ce qui est le cas de 9 maisons de l'échantillon, et une seule en zone H3.

21. Soit embrasures profondes, soit débords de toiture.

Plus généralement, le ratio global de surface vitrée par rapport à la SHON varie de 6 à 21 %, avec une moyenne à 14 % sur les 19 maisons individuelles de notre échantillon. En collectif, le ratio global varie de 10 à 20 % sur notre échantillon de 12 opérations, avec une moyenne à 15 %. En logement, le ratio ne semble pas lié ni à la zone climatique, ni au niveau de performance visé, ni au fait que l'on soit en rénovation ou en construction neuve.

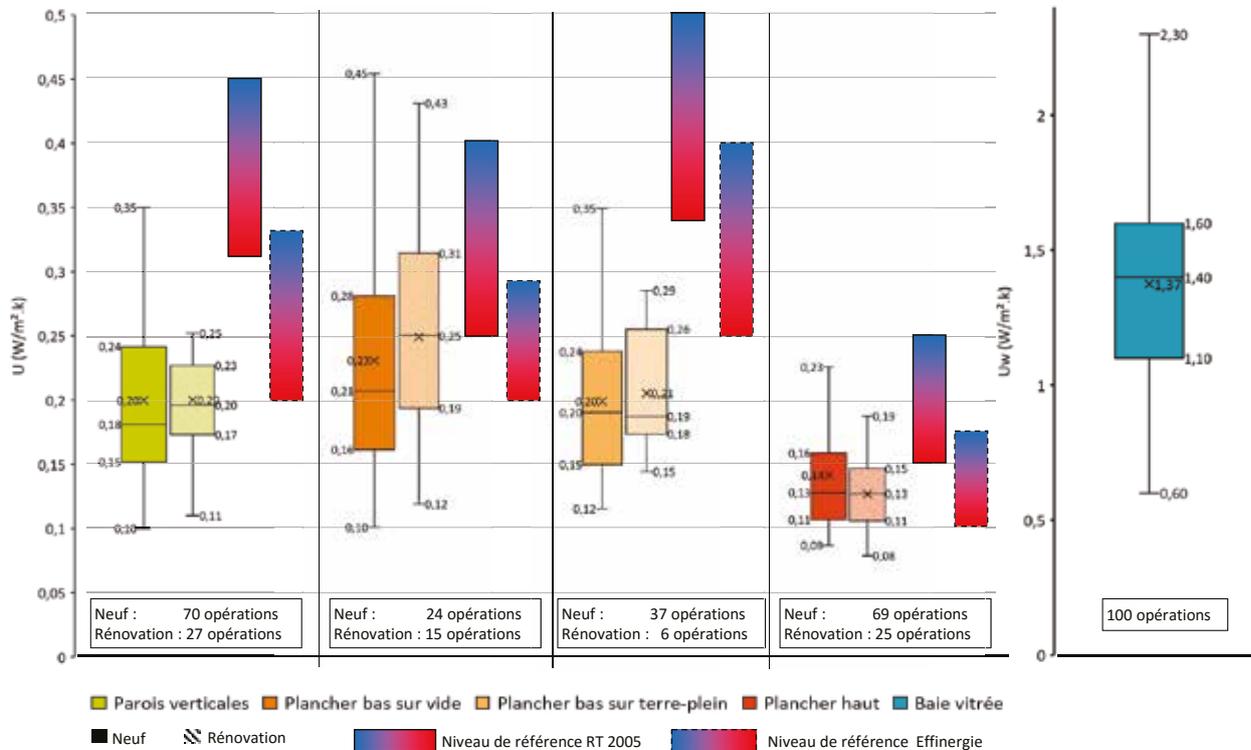
Illustration 96 – Ratio de la surface vitrée par rapport à la SHON en tertiaire



En tertiaire, les ratios sont très variables, de 1 % à 20 % de la SHON pour le sud, et de 7 à 33 % pour le ratio global. On observe toutefois que les ratios sud sont plus importants dans les bureaux de notre échantillon que dans les autres catégories tertiaires, avec des taux de surfaces vitrées globaux importants. Le taux de surface vitrée global en bureau est en moyenne de 15 %, du même ordre que dans le logement. Seuls 3 bureaux sont climatisés, dont un en zone H3, qui a aussi le ratio de surface vitrée le plus faible (7 %). Les ratios de surface de baies vitrées sont les plus élevés pour la fonction enseignement avec une moyenne de 20 %.

4.1.5 Synthèse des performances thermiques

Illustration 97 – Performance thermique des différentes parties de l'enveloppe



La performance des baies vitrées est, bien entendu, plus faible que celle des parties opaques de l'enveloppe. La performance thermique des menuiseries est bonne (classement Th 11 – Th 14, pour la moitié de l'échantillon le coefficient U_w est compris entre 1,1 et 1,6 $W/m^2.K$), voire très bonne (coefficient U_w inférieur à 1 $W/m^2.K$), sauf pour quelques opérations (coefficient U_w supérieur à 2 $W/m^2.K$, en rénovations ou dans le Sud).

Toutefois, la performance des baies vitrées ne peut pas être jugée seulement sur leur capacité d'isolation, mais également sur leur capacité à transmettre des apports solaires.

À retenir

La paroi présentant toujours le niveau d'isolation le plus élevé est le plancher haut avec un U médian à 0,13 $W/m^2.K$. Les niveaux de performance des planchers hauts correspondent quasiment aux niveaux observés dans la publication du guide d'Effinergie de 2008, « Réussir un projet BBC ».

L'isolation des murs est très performante avec un U médian à 0,19 $W/m^2.K$, et même meilleure que les niveaux observés dans le guide d'Effinergie.

Pour les planchers bas, l'isolation est meilleure sur terre-plein que sur vide sanitaire : valeur médiane à 0,19 $W/m^2.K$ contre 0,23 $W/m^2.K$. Ces résultats sont meilleurs que ceux publiés par Effinergie en 2008, car il s'agit d'opérations plus récentes.

4.2 Isolation thermique de l'enveloppe

4.2.1 Coefficient de déperdition par transmission thermique à la conception ($U_{bât}$)

Le coefficient de déperdition par transmission thermique $U_{bât}$ de l'étude thermique réglementaire est calculé selon les règles Th-Bât.

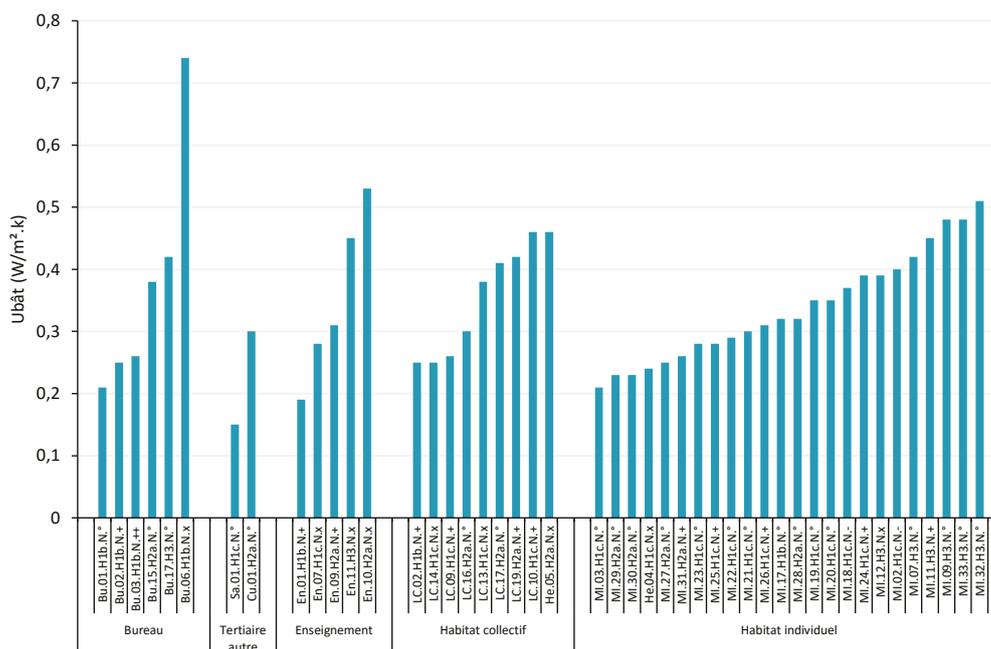
Les coefficients $U_{bât}$ de l'étude thermique réglementaire relevés sont reportés dans l'illustration 98 pour les bâtiments neufs et dans l'illustration 106 pour les rénovations.

Bâtiments neufs

Pour les bâtiments neufs, sur un échantillon de 46 opérations, le $U_{bât}$ déterminé à la conception varie entre 0,76 W/m².K et 0,19 W/m².K avec une moyenne autour de 0,36 W/m².K. Plus précisément, les maisons ont un $U_{bât}$ en moyenne meilleur (de 0,34 W/m².K) que le collectif et l'enseignement (en moyenne de 0,35 W/m².K). Viennent ensuite les bureaux avec un $U_{bât}$ de 0,38 W/m².K en moyenne. C'est dans les bâtiments de bureaux que l'on trouve les écarts de $U_{bât}$ les plus importants (de 0,21 à 0,74 W/m².K), tandis que le collectif présente les valeurs les moins dispersées (de 0,25 à 0,46 W/m².K).

Concernant la zone climatique, on ne voit pas apparaître de différence en matière de performance entre les zones H1c et H2a. La zone climatique H3, en ce qui concerne la maison individuelle, a logiquement les $U_{bât}$ les moins performants.

Illustration 98 - $U_{bât}$ de l'étude thermique réglementaire



On observe donc que le $U_{\text{bât}}$ des bâtiments de notre échantillon est toujours inférieur à $0,55 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, sauf pour le bâtiment de bureaux Bu.06.H1b.N.X. Pour cette dernière opération, les performances du vitrage et de la façade rideau en aluminium dégradent la performance de l'enveloppe et conduisent à un $U_{\text{bât}}$ de $0,74 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

La performance du $U_{\text{bât}}$ dépend de plus en plus de la prise en compte des ponts thermiques à la conception, et de leur évitement ou de leur traitement. En effet, l'impact des ponts thermiques est d'autant plus important que l'isolation des parois est importante.



En conception, il s'agit avant tout de choisir un système constructif (ITE, ITR, ITI, mixte) adapté à l'architecture du bâtiment pour réduire le nombre de ponts thermiques, et de traiter de manière soignée les jonctions restantes. Voici les principales techniques utilisées sur notre échantillon :

Pour un logement collectif en Auvergne :

« La double isolation par l'intérieur et l'extérieur permet de réduire le nombre de ponts thermiques. »

Pour un bâtiment d'enseignement en Bretagne :

« L'isolation extérieure du bâtiment permet d'éviter les ponts thermiques des planchers intermédiaires. »

Pour un EHPAD en Lorraine :

« Les fenêtres sont posées au nu extérieur de la façade : le retour d'isolation des menuiseries est donc traité. »

Pour un bâtiment à fonction mixte en Lorraine :

« Isolation périphérique du dallage plancher bas par du polystyrène extrudé. »

Pour un bureau en Lorraine :

« Le poteau faisant jonction entre deux baies vitrées a été recouvert par de l'isolant pour limiter le pont thermique. »

Pour un bureau en Rhône-Alpes :

« Retombées par isolation rapportée et rupteurs de ponts thermiques. »

Pour des bâtiments de logement collectif en Rhône-Alpes :

« Balcons désolidarisés en structure métallique. »

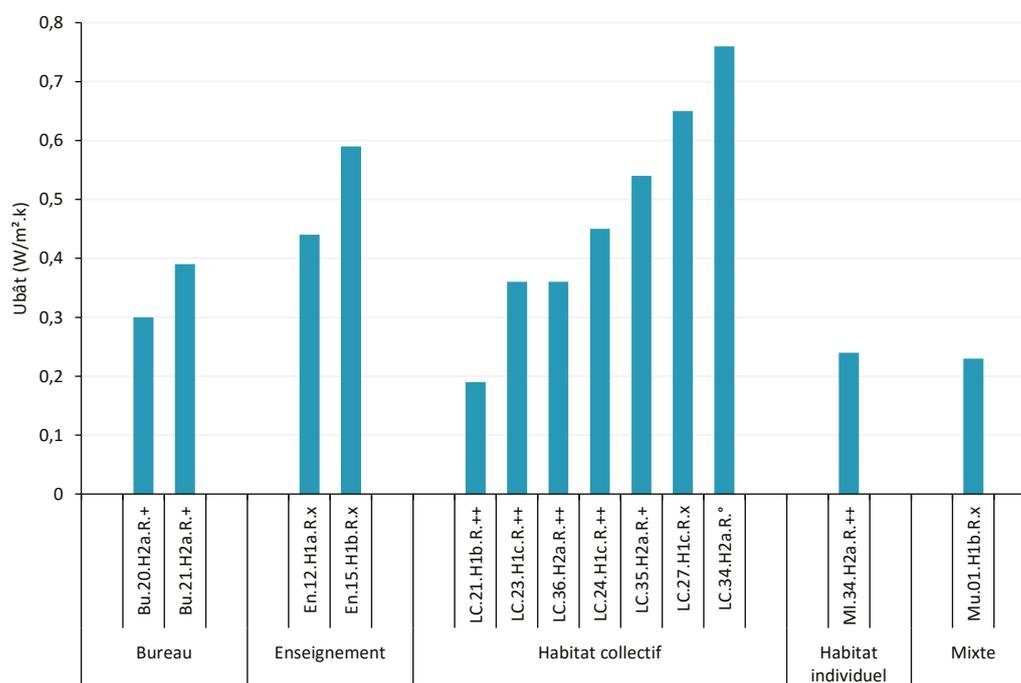
Bâtiments rénovés

L'échantillon de bâtiments rénovés ne comporte que 14 opérations. Ce sont des rénovations globales concernant toutes les parois et les vitrages.

On peut observer sur les 7 bâtiments de logement collectif que le $U_{\text{bât}}$ déterminé à la conception varie entre $0,76 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ et $0,19 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ avec une moyenne autour de $0,47 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (Illustration 106). La variation est aussi importante que dans le neuf, le $U_{\text{bât}}$ moyen est quant à lui moins bon.

Les six autres bâtiments ont un niveau d'isolation des parois et des planchers hauts et bas similaire au niveau des performances moyennes observées dans le neuf. Ainsi, la différence de performance globale que l'on observe sur ces opérations est principalement liée à la performance des vitrages mis en place : $1,1$ à $1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour les trois plus performants, et $1,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour les autres.

Illustration 99 – $U_{\text{bât}}$ de l'étude thermique réglementaire et sa composition pour les rénovations



En rénovation, le choix de solutions pour traiter les ponts thermiques est plus limité que dans le neuf. Par exemple, sur notre échantillon, pour un logement collectif en Rhône-Alpes, concernant les parois opaques :

▮ « *Traitement classique par recouvrement acrotère et par l'ITE.* »

et concernant la liaison fenêtre/mur :

▮ « *Reprise des tableaux et linteaux complétée par la mise en place de précadres métalliques en applique : le réglage et l'ajustement de ces pièces ont nécessité beaucoup de temps.* »

À retenir

En général, l'enveloppe des bâtiments de notre échantillon est conçue pour être très performante, avec un $U_{\text{bât}}$ moyen de 0,36 W/m².K en neuf et de 0,47 W/m².K en rénovation. Pour une même catégorie (neuf ou rénovation), les bâtiments présentent tous - sauf un - un niveau d'isolation des parois opaques similaire. La différence de performance obtenue sur le $U_{\text{bât}}$ se joue ensuite au niveau de la performance des baies vitrées choisies et de la prise en compte des ponts thermiques et de leur traitement (ponts thermiques intégrés, ponts thermiques de jonction menuiserie/paroi et ponts thermiques parois plancher haut ou parois/plancher bas).

4.2.2 Mise en œuvre de l'isolation

La mise en œuvre de l'isolation a été évaluée par des suivis de chantier et des diagnostics par caméra thermique sur une vingtaine de bâtiments.

Pose de l'isolation soignée pour les modes constructifs courants

La thermographie infrarouge permet de mettre en évidence des défauts sans pouvoir quantifier réellement leur importance. Les discontinuités d'isolation et les défauts de pose peuvent être identifiés de manière univoque. Sur l'ensemble des thermographies réalisées, nous avons rarement observé ce type de défaut.



Globalement, sur l'échantillon, la pose des isolants a été soignée.

Cependant, sur cinq opérations, des difficultés de mise en œuvre ont été constatées lors du suivi de chantier :

- la pose de l'isolant n'a pas été soignée sur deux opérations ;

Pour un bâtiment d'enseignement en ossature bois en Lorraine :

« Mise en œuvre chaotique de la laine de verre en plancher haut du bâtiment neuf. Les morceaux ne sont pas toujours jointifs. Le pare-vapeur est abîmé par endroits. »

Pour un bâtiment de santé en Bretagne :

« Certains éléments en béton n'ont pas été isolés. »

- la réalisation de murs à isolation répartie a été délicate pour trois opérations ;

Pour une maison en Bretagne :

« Défaut de calepinage susceptible d'entraîner un pont thermique ponctuel si repris au mortier ou un défaut d'étanchéité. »

Pour deux de ces trois opérations, la mauvaise mise en œuvre semble liée à un retard sur le planning et à des défaillances d'entreprises en cours de chantier, qui ont conduit à l'intervention de nouveaux acteurs et sous-traitants avec moins de soin apporté aux dernières maisons.

Illustration 100 – Défaut de mise en œuvre de mur monomur en Bretagne (hors échantillon)



Ponts thermiques à traiter

Lors de l'évaluation de l'enveloppe par thermographie, il est souvent difficile de déterminer si un pont thermique est bien traité ou non.



En revanche, nous avons observé quelques ponts thermiques de refend ou situés au niveau des combles pouvant être traités par un large choix de techniques ne présentant aucune difficulté de mise en œuvre.

Pour une école en Île-de-France :

« Toiture terrasse: pas de retour d'isolant sur le mur de refend. »

Pour une maison en Auvergne :

« Les défauts observés proviennent des soubassements qui sont déperditifs (pont thermique de liaison avec le plancher bas). »

Illustration 101 - Mise en évidence d'un pont thermique plancher bas sur une crèche

Thermogramme



Image réelle correspondante



À retenir

L'observation des défauts laisse penser que la recherche et le traitement de l'ensemble des ponts thermiques ne sont pas encore systématiques, mais se concentrent plutôt sur les ponts thermiques courants ou présentant les longueurs les plus importantes.

Protection contre les intempéries

La performance (voire la durabilité) de l'isolation est particulièrement sensible à l'exposition à l'eau.



Peu de chantiers ont mis en place des procédures pour les protéger de l'exposition à la pluie.

Sur l'illustration 102, le bâtiment à ossature bois et isolation paille a été protégé et bâché. Les bottes de paille sont stockées à l'intérieur.

Mais la protection contre les intempéries ne semble pas généralisée. La pluie a ainsi dégradé l'isolation sur deux chantiers. Dans le bâtiment de Bretagne (Illustration 103), l'isolant bois a été dégradé par la neige et a dû être remplacé.

Illustration 102 – Protection contre les intempéries d'un bâtiment paille



Illustration 103 – Isolation dégradée par la pluie en Bretagne



Présence d'humidité dans la paroi ossature bois



Humidité nécessitant un démontage du frein vapeur et un remplacement des matériaux

Pour une maison individuelle en Auvergne :

« Un gros problème de mise en œuvre des menuiseries: le bois des cadres n'était pas sec au moment de la pose. La plupart des montants ont travaillé ou se sont vrillés. Conséquence: de gros défauts d'étanchéité à l'air sur la plupart des vitrages. »

À retenir

La protection aux intempéries n'est toujours pas suffisamment prise en compte lors de la pose des isolants, ce qui peut non seulement nuire aux performances thermiques, mais aussi entraîner des dégradations et des remplacements.

4.2.3 Coefficient évalué de déperdition par transmission thermique ($U_{\text{bât évalué}}$)

Le coefficient $U_{\text{bât évalué}}$ est déduit du bilan thermique des mesures selon la méthode exposée au § A.3.2.

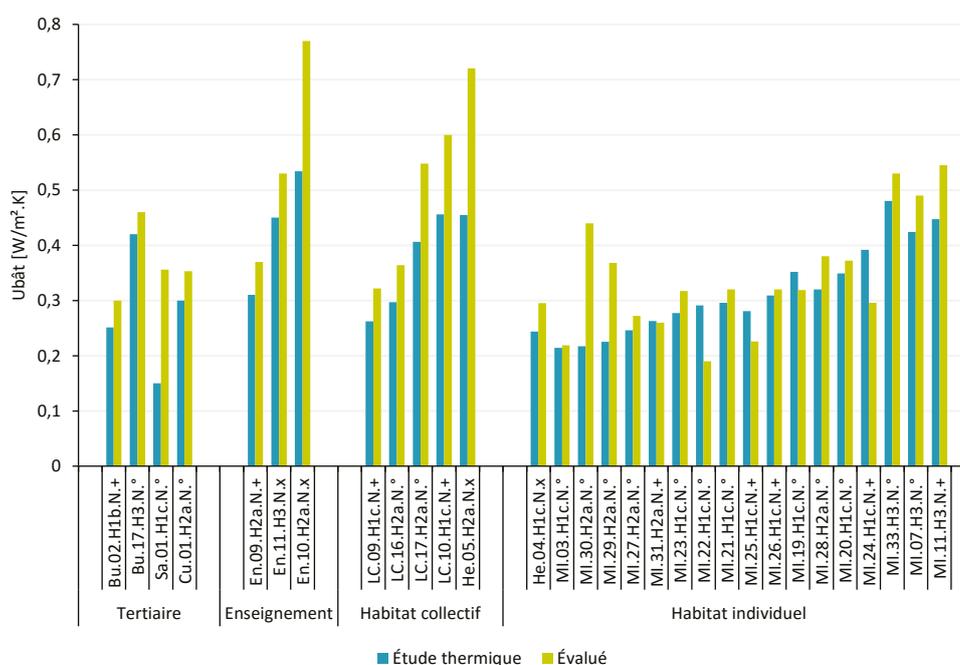


L'incertitude de la méthode en développement ne peut toutefois permettre de tirer des conclusions définitives sur les premiers résultats qui suivent.

Bâtiments neufs

Dans l'illustration 104 sont présentés les $U_{\text{bât}}$ de l'étude thermique réglementaire et les $U_{\text{bât évalué}}$ pour 31 opérations neuves (dont 19 maisons individuelles). Pour les maisons individuelles, le $U_{\text{bât évalué}}$ vaut en moyenne 0,34 W/m².K (variant de 0,19 à 0,55 W/m².K), contre des $U_{\text{bât}}$ de l'étude thermique réglementaire valant en moyenne 0,31 W/m².K (variant de 0,21 à 0,48 W/m².K).

Illustration 104 – Bâtiment neufs : les coefficients de déperdition $U_{\text{bât}}$ et $U_{\text{bât évalué}}$



Les écarts entre le $U_{\text{bât évalué}}$ et le $U_{\text{bât}}$ ont plusieurs origines sans que l'on puisse estimer la part de chacune :

- **la qualité des études thermiques** : les études réglementaires thermiques ont été vérifiées en phase de conception, mais pas forcément mises à jour en phase de chantier. On observe ainsi dans les calculs une sous-estimation de certains ponts thermiques ou de leurs métrés : mauvaise prise en compte des ponts thermiques structurels et singuliers, en particulier pour les structures métalliques et les bardages ;
- **le changement de matériaux et de leurs caractéristiques** pendant le chantier par rapport aux prescriptions du CCTP ;



- **la qualité de la mise en œuvre** : performance de l'isolation dégradée par exposition à la pluie ou à la neige, isolation insuffisante des linteaux des baies vitrées, des volets roulants ou des acrotères, mauvaise mise en œuvre de monomurs (Illustration 100).

Il est toutefois difficile d'établir une hiérarchisation ou une quantification de l'impact de chaque élément, l'évaluation du $U_{\text{bât évalué}}$ étant globale.



Par ailleurs, les écarts peuvent s'expliquer par des paramètres entrant dans le calcul du $U_{\text{bât évalué}}$ difficiles à évaluer comme l'ouverture de fenêtres, les apports solaires et d'occupation. Les résultats sont donc à prendre avec précaution :

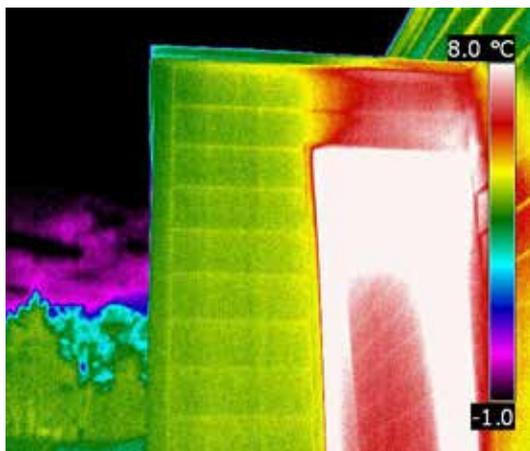
Dans la crèche En.10.H2a.N.+ :

« Les occupants laissent les fenêtres ouvertes la nuit (chauffage allumé), pour refroidir le bâtiment, et compenser les surchauffes en journée dues notamment à des apports solaires importants par de grandes surfaces vitrées peu protégées. »

Dans l'opération Sa.01.H1c.N. :

« Les apports internes sont mal connus (nombre d'occupants, apports dus aux équipements électriques). »

Illustration 105 – Mise en évidence des déperditions aérauliques par ouverture des fenêtres de nuit



Thermogramme En.10.H2a.N.+



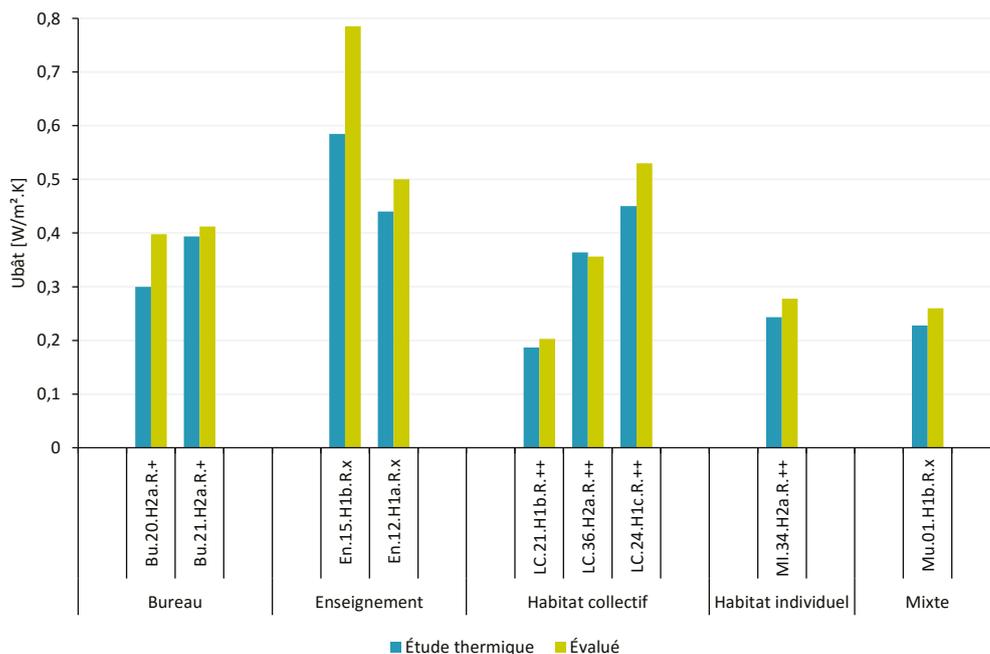
Photo numérique En.10.H2a.N.+

Bâtiments rénovés

Dans l'illustration 109 sont présentés les $U_{\text{bât}}$ de l'étude thermique réglementaire et les $U_{\text{bât}}^{\text{évalué}}$ pour 9 opérations rénovées.

Les écarts entre le $U_{\text{bât}}^{\text{évalué}}$ et le $U_{\text{bât}}$ ont les mêmes origines que pour le neuf, avec des ponts thermiques supplémentaires plus difficiles à traiter (balcons en ITE, retour d'isolation mur/ fenêtre ou mur/coffre de volets roulants).

Illustration 106 – Bâtiment rénové : les coefficients de déperdition $U_{\text{bât}}$ et $U_{\text{bât}}^{\text{évalué}}$



À retenir

Sur les bâtiments suivis, les $U_{\text{bât}}^{\text{évalué}}$ sont supérieurs aux théoriques pour 35 bâtiments sur 40. Les principales causes d'écart sur le bâti sont la sous-estimation ou la mauvaise prise en compte de certains ponts thermiques dans les calculs ou sur chantier : liaisons avec le plancher bas, ponts thermiques intégrés aux parois, et en rénovation retours d'isolation sur balcons, fenêtres ou volets roulants. Dans certains cas, la valeur du $U_{\text{bât}}^{\text{évalué}}$ traduit aussi l'action des occupants sur leur bâti, comme l'ouverture des fenêtres, ou bien des défauts de mise en œuvre.

4.2.4 Impact du $U_{\text{bât}}$ sur le besoin de chauffage

L'illustration 107 montre le calcul de l'influence de l'écart entre le $U_{\text{bât}} \text{ évalué}$ et le $U_{\text{bât RT}}$ sur le besoin de chauffage pour les opérations de notre échantillon. On note que le besoin de chauffage est très sensible aux faibles variations du $U_{\text{bât}}$.

Illustration 107 – Impact du $U_{\text{bât}} \text{ évalué}$ sur le besoin de chauffage calculé en bâtiments neufs

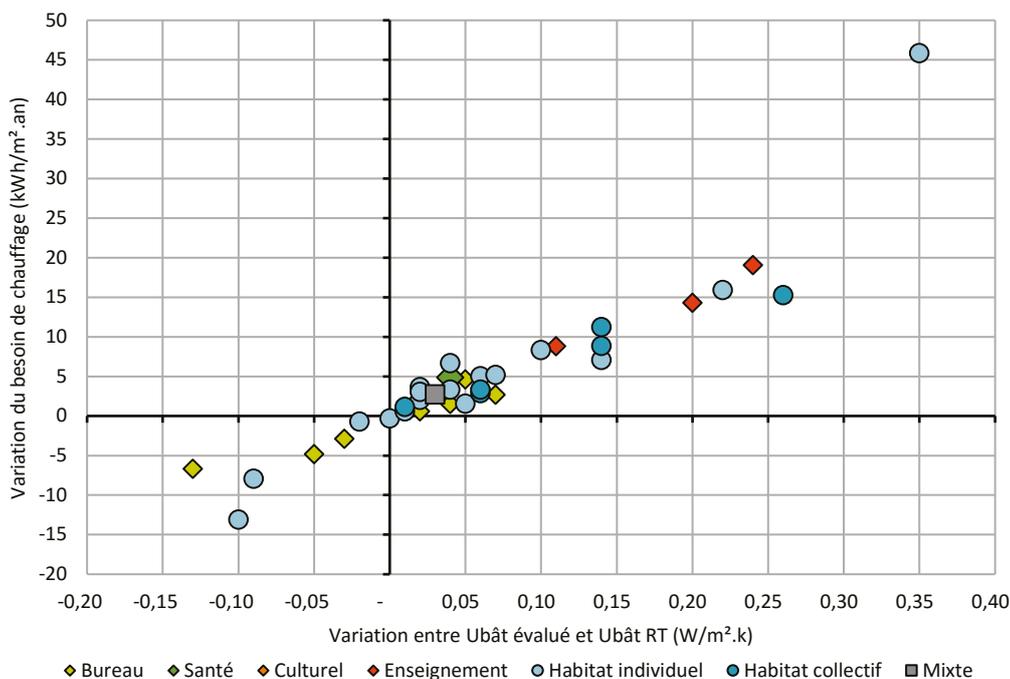
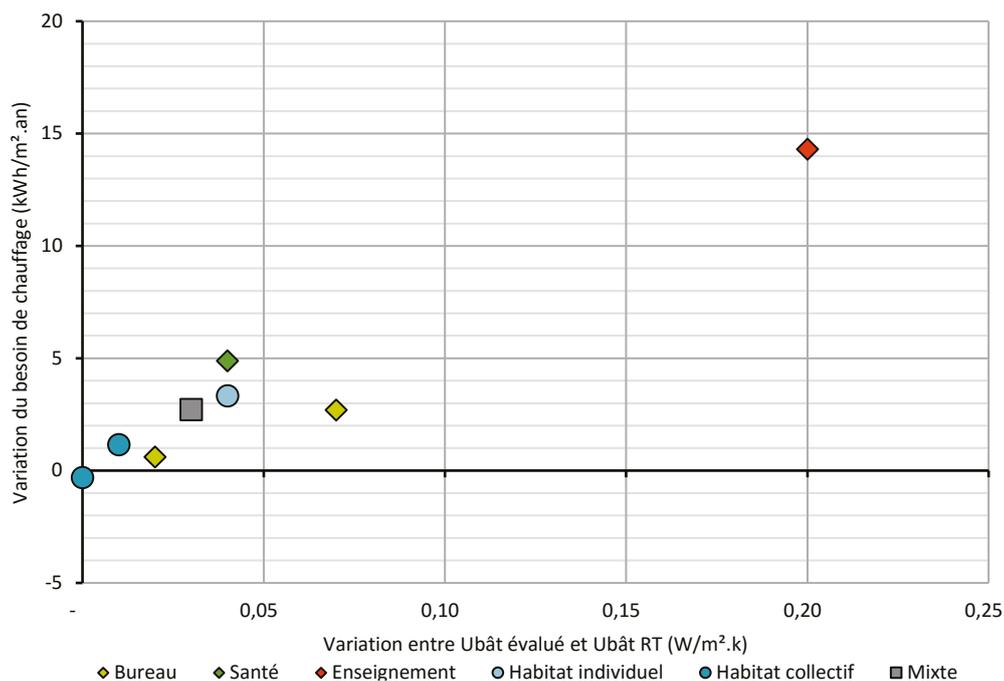
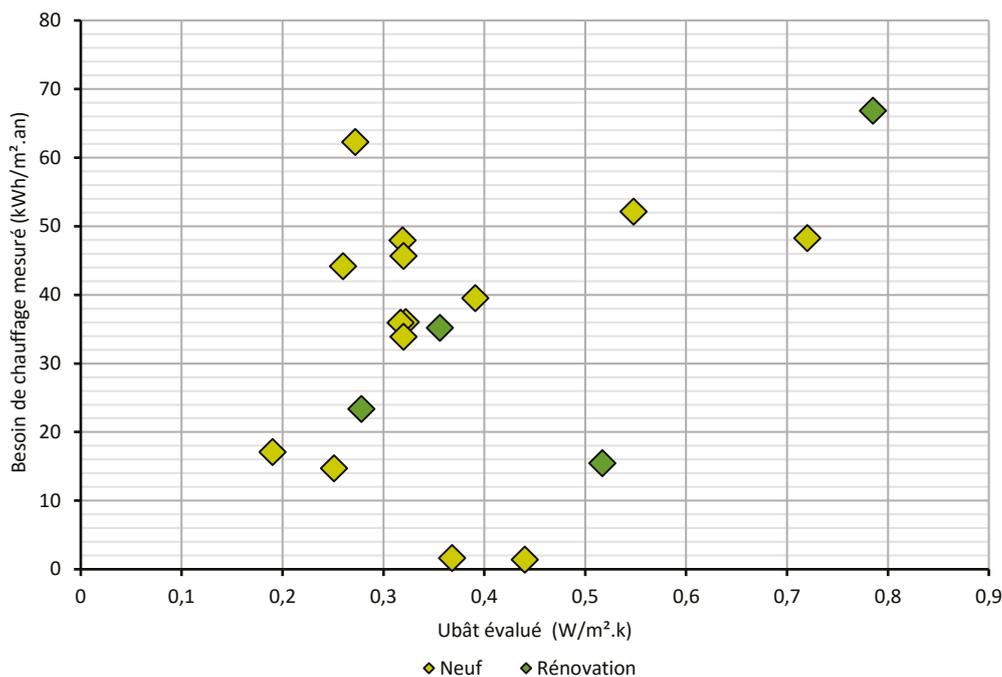


Illustration 108 – Impact du $U_{\text{bât}} \text{ évalué}$ sur le besoin de chauffage calculé en rénovation



Sur l'illustration 109, la quantité de chaleur mesurée pour la production de chauffage est tracée en fonction du $U_{\text{bât évalué}}$ pour les bâtiments de logements. Globalement on observe une proportionnalité entre le besoin de chauffage et le $U_{\text{bât évalué}}$, mais de manière beaucoup plus dispersée. Cependant, dans certains cas, la performance de l'enveloppe n'est pas le critère le plus influant sur le besoin de chauffage. Parmi ces cas, on peut noter une opération de maison individuelle pour laquelle le besoin de chauffage dépend principalement d'une température de consigne de chauffage élevée (§ 3.1.1 page 70). Inversement pour deux autres maisons individuelles, le climat très clément de l'hiver a permis de faire chuter les besoins en chaud.

Illustration 109 – Besoin de chauffage mesuré en fonction du $U_{\text{bât évalué}}$



4.3 Perméabilité à l'air de l'enveloppe

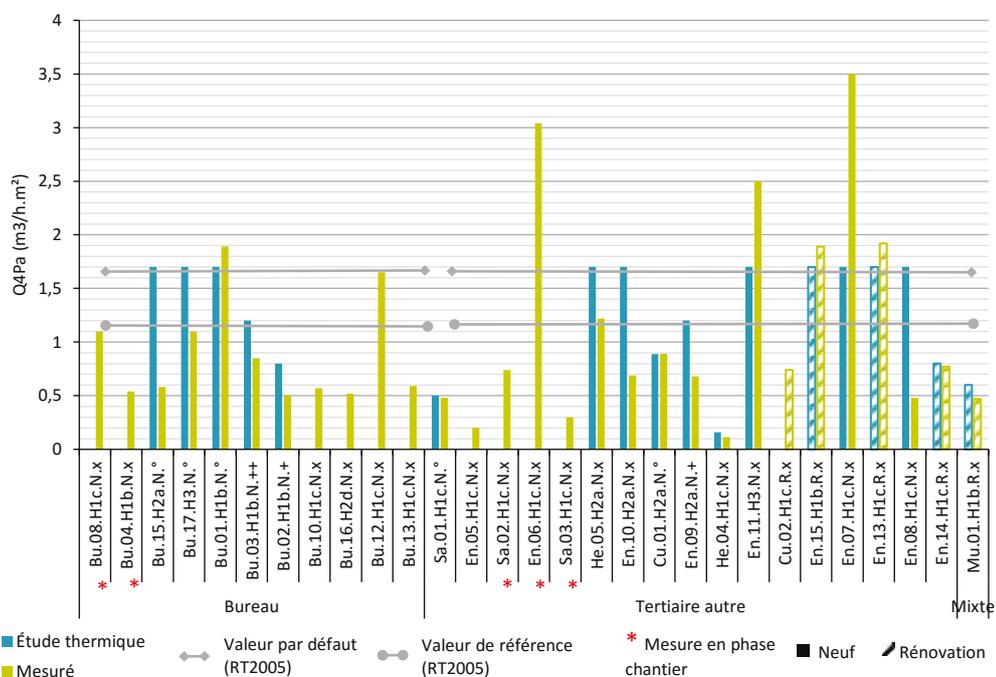
4.3.1 Perméabilité à l'air mesurée

Dans la méthode Th-CE 2005, la perméabilité à l'air est caractérisée par l'indicateur Q_{4Pa_surf} , qui indique le débit de fuite pour une pression différentielle de 4 pascals (entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment) divisé par la surface de parois froides hors plancher bas.

Cet indicateur est mesuré soit à la demande du maître d'ouvrage, soit dans le cadre des suivis-évaluations PREBAT.

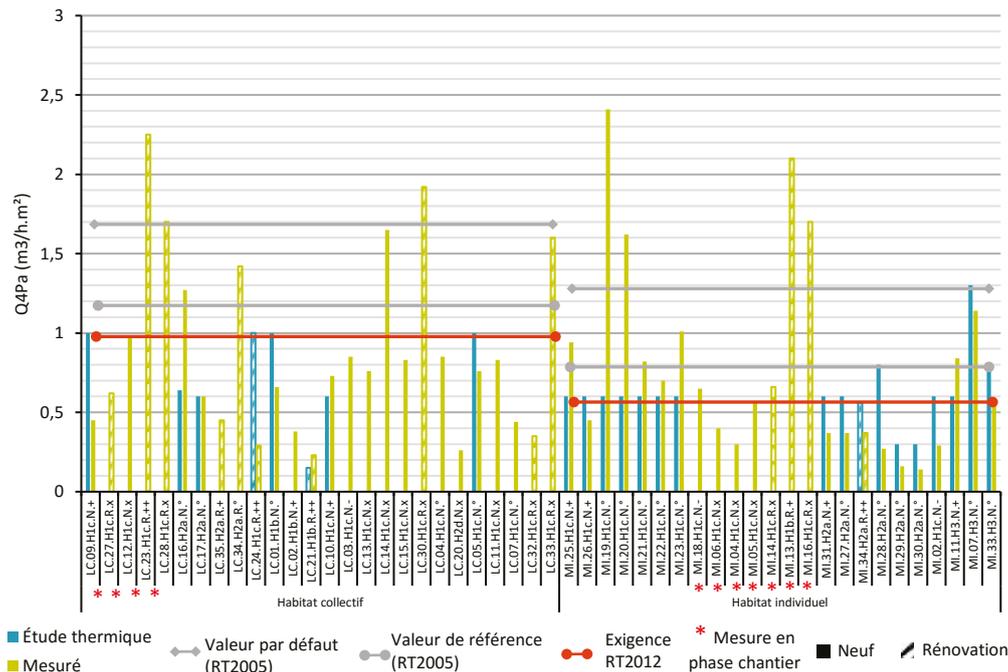
Pour les bâtiments tertiaires (Illustration 110), la perméabilité à l'air a souvent été saisie dans le calcul réglementaire comme valeur par défaut ($Q_{4P_surf} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$).

Illustration 110 – Les perméabilités à l'air mesurées et leurs valeurs visées dans l'étude thermique réglementaire pour les bâtiments tertiaires



En revanche, les bâtiments d'habitation (Illustration 111) ont visé le niveau du label BBC Effinergie ou l'exigence de la RT 2012 pour la maison individuelle neuve ($Q_{4P_surf} \leq 0,6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$), voire le niveau du label « Passivhaus » ($Q_{4P_surf} < 0,2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$).

Illustration 111 - Les perméabilités à l'air mesurées et leurs valeurs visées dans l'étude thermique réglementaire pour les bâtiments d'habitation



L'étanchéité à l'air mesurée est généralement satisfaisante. Elle est même inférieure à 1 m³/h.m² pour deux tiers des bâtiments.

Certains bâtiments de rénovation présentent des valeurs mesurées supérieures à la valeur par défaut. Cela est lié à des difficultés pour mettre en œuvre la rénovation de l'enveloppe et en particulier les nouvelles menuiseries.

Certaines opérations neuves présentent aussi des valeurs supérieures à la valeur par défaut. Pour les opérations En.06.H1c.N.x et En.07.H1c.N.x, les valeurs présentées sont des mesures en phase chantier. Les mesures issues de la phase chantier sont repérées sur les illustrations 110 et 111.



Dans les cas des habitations individuelles, les opérations MI.19.H1c.N.° et MI.20.H1c.N.° présentent des défauts importants de perméabilité à l'air liés à l'absence de sensibilisation de la maîtrise d'œuvre. Ainsi, la barrière d'étanchéité à l'air a été traversée lors de la pose des conduits de ventilation et aucune disposition n'a été prise pour réduire l'impact de cette traversée. L'opération MI.23.H1c.N.°, maison individuelle, présente des défauts plus nombreux que les maisons MI.21.H1c.N.° et MI.22.H1c.N.° du même lot. Cette opération n'a pas fait l'objet de mesures pendant la phase chantier, contrairement aux deux autres.

Les principaux défauts d'étanchéité rencontrés se situent au niveau des assemblages menuiseries/parois et volets roulants/parois. Des problèmes d'étanchéité apparaissent aussi au niveau des appareillages électriques (prises, interrupteurs...), des éléments traversant les parois, les sols (adduction d'eau potable, évacuation des eaux usées, etc.).

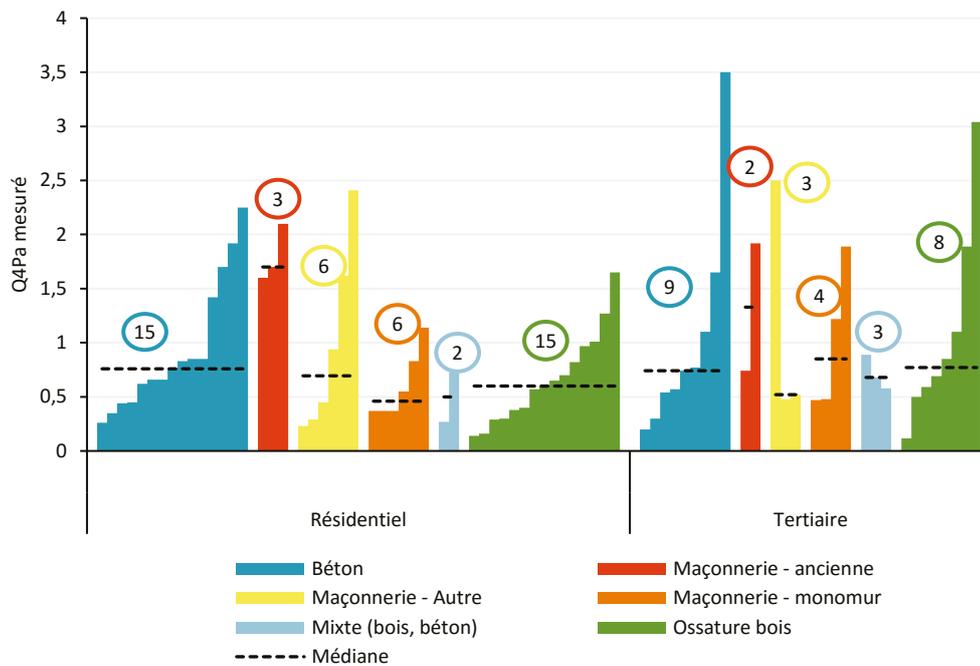
Pour un bâtiment mixte (tertiaire et habitation) en Lorraine :

« Une mesure en phase chantier a été réalisée. Ce test a permis de détecter des fuites au niveau des menuiseries. Ces défauts d'étanchéité ont été réglés. »

4.3.2 Impact du système constructif sur la perméabilité à l'air

Le système constructif peut, par sa nature, réduire les points singuliers à traiter en termes de perméabilité à l'air. En particulier la construction bois, dont les panneaux sont préfabriqués en usine, présente des résultats de perméabilité à l'air meilleurs que les autres systèmes constructifs (Illustration 112).

Illustration 112 - Répartition des perméabilités à l'air mesurées en fonction du système constructif



Impact du système de ventilation sur la perméabilité à l'air

Dans notre échantillon, le croisement du système de ventilation avec le coefficient Q_{4Pa} mesuré montre que la perméabilité à l'air de l'enveloppe est globalement moins bonne lors de l'installation d'un système de ventilation double flux dans le cas d'un système simple flux.

Les résultats sont à considérer en tenant compte de l'échantillon de mesures exploitable. En effet l'échantillon, en particulier en système simple flux, est réduit et peut donc engendrer des biais sur le résultat.

Illustration 113 – Répartition des perméabilités à l'air mesurées dans les bâtiments d'habitation en fonction du système de ventilation

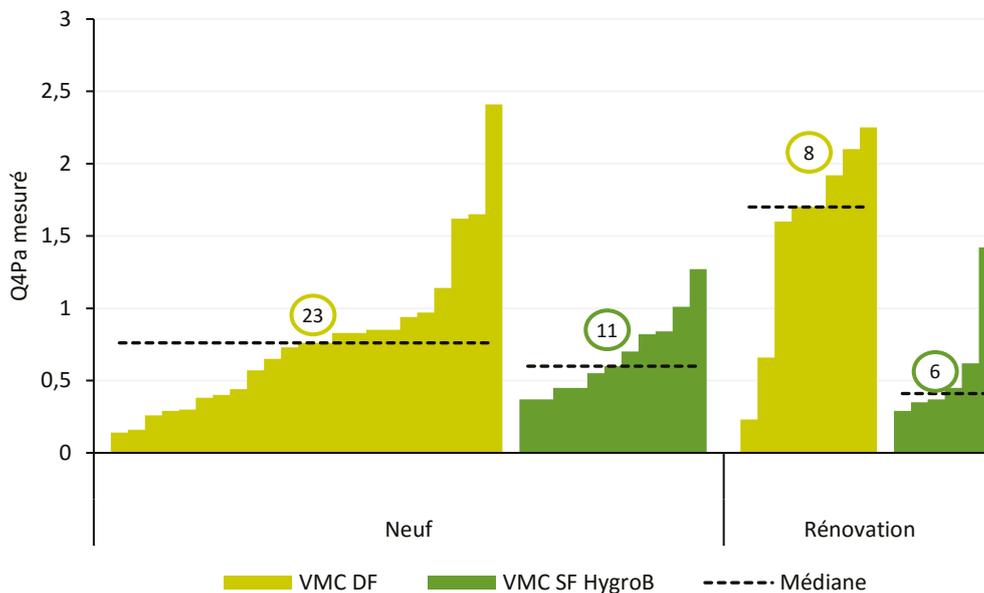
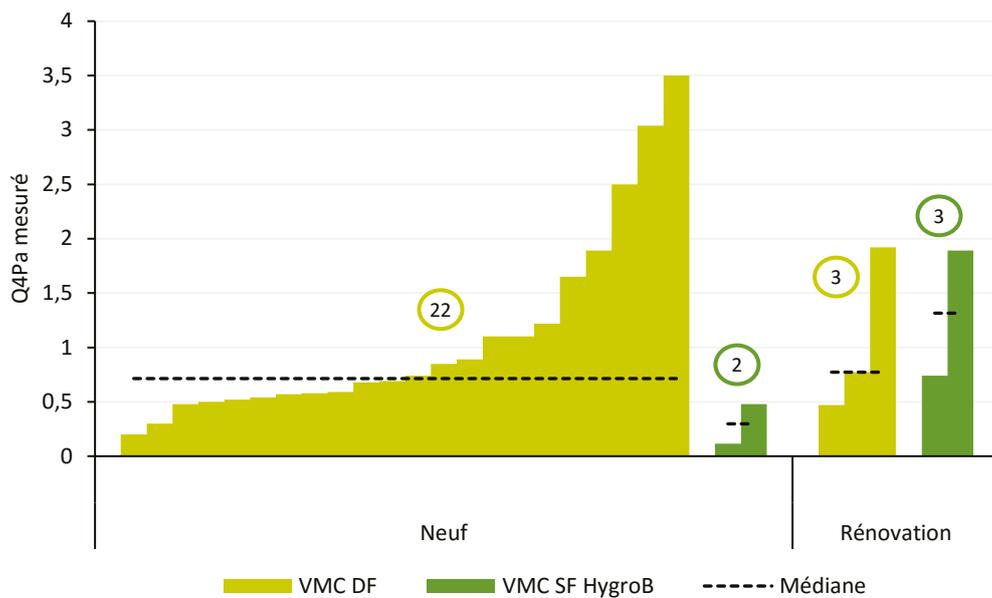


Illustration 114 – Répartition des perméabilités à l'air mesurées dans les bâtiments tertiaires en fonction du système de ventilation



4.3.3 Impact calculé de la perméabilité à l'air mesurée sur le besoin de chauffage

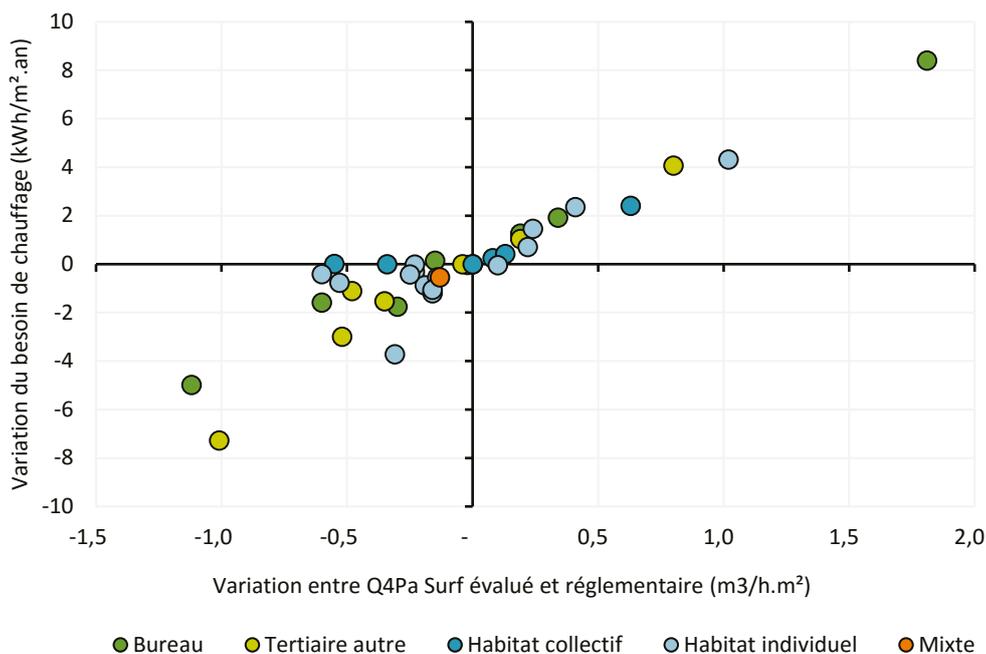
Les besoins de chauffage de l'étude réglementaire ont été recalculés avec les perméabilités à l'air mesurées (Illustration 115).

La perméabilité à l'air d'un bâtiment est très sensible à l'orientation du vent ainsi qu'à sa vitesse. Dans les règles de calculs ThCE, le calcul des pertes par défaut d'étanchéité dépend de l'orientation principale du vent (façade au vent ou sous le vent) et de la vitesse du vent.

L'impact calculé sur les besoins de chauffage est en général modéré (moins de 4 kWh/m².an), car la valeur mesurée de perméabilité reste souvent proche du niveau choisi lors de la conception. Ainsi, un défaut d'étanchéité à l'air qui entraînerait une dégradation du Q_{4P_surf} de 0,5 augmenterait le besoin de chauffage à hauteur de 2 kWh/m².an.

En revanche, l'impact peut être très bénéfique, comme pour cette opération en Bretagne qui réduit son besoin de chauffage de près 5 kWh/m².an en baissant sa perméabilité de l'indice de référence 1,7 à 0,6.

Illustration 115 – Évolution du besoin de chauffage après recalcul avec la perméabilité à l'air mesurée



À retenir

L'étanchéité à l'air est globalement bien réalisée sur les bâtiments de l'échantillon. L'impact de l'étanchéité sur la consommation de chauffage est d'autant plus réduit que les valeurs visées sont faibles.

Les pertes énergétiques par infiltration d'air restent ainsi limitées. Les principaux défauts restants concernent les joints entre la menuiserie et son encadrement, le passage des réseaux (électricité, chauffage et ventilation) et la jonction au niveau des coffres de volets roulants. Des efforts à la mise en œuvre peuvent encore être réalisés sur ces différents points.



Performances énergétiques des systèmes techniques

L'essentiel

La performance des équipements énergétiques installés influe directement sur la consommation des bâtiments. Outre les performances affichées par le constructeur qui permettent d'estimer le niveau de consommation des systèmes, leur mise en œuvre, leur gestion et leur entretien ont un fort impact.

Les coefficients de performance saisonniers des pompes à chaleur (PAC) issus des mesures sur site apparaissent bons voire très bons (compris entre 3 et 5). Dans de nombreux cas, il a tout de même été relevé un surdimensionnement de la puissance des PAC installées engendrant des cycles courts qui leur sont nuisibles. Dans le cas des chaudières, les surdimensionnements sont également courants et sont liés à la production d'eau chaude sanitaire qu'elles assurent.

En ce qui concerne l'eau chaude sanitaire solaire, les couvertures solaires apparaissent relativement disparates d'une installation à l'autre. Les conditions météorologiques n'en sont pas les seules explications : les besoins sur ou sous-estimés, la longueur du bouclage dans le cas d'une installation centralisée, le dysfonctionnement des pompes ou l'absence de clapet anti-retour sur l'arrivée d'eau froide sont autant de critères observés qui influent fortement sur la couverture solaire.

Dans l'ensemble des opérations, les réseaux de chauffage et d'eau chaude sanitaire sont isolés. Cependant il a très souvent été remarqué que les organes comme par exemple les pompes ou les vannes ne le sont pas. De plus, les réseaux bouclés, principalement d'eau chaude sanitaire, sont encore très déperditifs malgré leur isolation. Une sur-isolation des linéaires ainsi que l'isolation des différents organes pourraient permettre de réduire ces pertes qui contribuent certes au chauffage en hiver, mais sont des sources de chaleur non souhaitables en été.

Concernant les systèmes de ventilation double flux, très représentés dans l'échantillon étudié, les efficacités mesurées de leurs échangeurs s'avèrent être supérieures à 70 %, en dehors de quelques cas de dysfonctionnement. Cependant les occupants sont peu sensibilisés à l'entretien de ces systèmes. Il s'agit pourtant d'un enjeu fort d'un point de vue de la qualité de l'air mais aussi de la consommation.

Par ailleurs, des dérives des consommations des auxiliaires des équipements ont pu être constatées ; elles correspondent le plus souvent à des durées de fonctionnement trop longues, des puissances installées trop élevées ou alors à l'absence de paramétrage des pompes à débit variable.

Les performances de l'installation d'éclairage reposent beaucoup sur son système de commande automatisée de l'extinction et sur l'adaptation de celui-ci aux fonctions des locaux, avec un enjeu particulier en période d'inoccupation.

Les suivis des équipements immobiliers tels que les ascenseurs montrent que des économies importantes peuvent également être réalisées.

Le suivi électrique des équipements mobiliers fait apparaître des consommations fortement liées à l'usage. Cependant des tendances ressortent, permettant d'envisager des économies à court ou moyen terme, par exemple en ce qui concerne les ordinateurs et les serveurs informatiques.

Les installations photovoltaïques montrent une production bénéfique toute l'année, mais aussi un certain nombre de dysfonctionnements.

5.1 Chauffage

5.1.1 De la simple chaufferie à la chaufferie trop complexe

Deux grandes familles de générateurs de chaleur assurent le chauffage dans les bâtiments de l'échantillon étudié (Illustrations 116 et 117):

- les chaudières gaz à condensation principalement installées dans les logements (61 % des logements collectifs dont 83 % avec une chaudière collective, 44 % des maisons individuelles, 32 % des bâtiments tertiaires);
- les pompes à chaleur (PAC), principalement installées dans les bureaux et les autres bâtiments tertiaires (36 % des bâtiments tertiaires et 18 % des logements). Parmi les pompes à chaleur, on retrouve essentiellement des PAC air/eau (43 % des PAC) et des PAC eau/eau (i.e. PAC géothermiques, 37 % des PAC), ainsi que quatre PAC air/air (13 % des PAC). Sur deux opérations, des PAC à absorption gaz ont été mises en place (7 % des PAC soit 2,5 % de l'échantillon total).

Ont été mises en place dans une moindre mesure des chaudières à bois (19 chaudières avec pour combustible des granulés, du bois déchiqueté ou des plaquettes, soit 15 % de l'échantillon total) ou des poêles à bois (3 maisons individuelles).

Trois maisons individuelles sont chauffées par des radiateurs électriques; dans deux opérations, des convecteurs électriques ont été installés et dans la troisième ce sont des panneaux rayonnants. Un bâtiment de logement collectif est doté d'un système de chauffage intégré au système de ventilation double flux. L'air insufflé est chauffé par des batteries chaudes électriques.

Une maison individuelle est chauffée par à un système de micro-cogénération.

Enfin, neuf bâtiments sont chauffés via un réseau de chaleur urbain (cinq tertiaires et quatre logements collectifs).

Illustration 116 – Résidentiel : répartition des différents types de production de chaleur

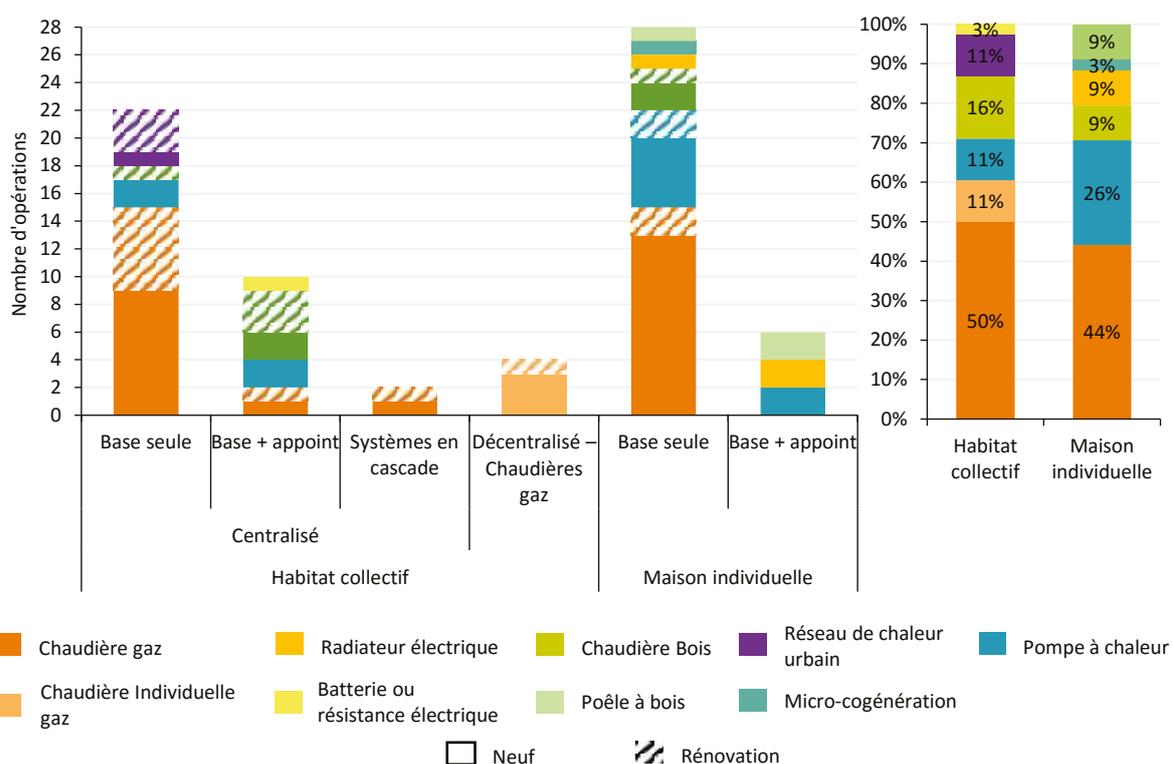
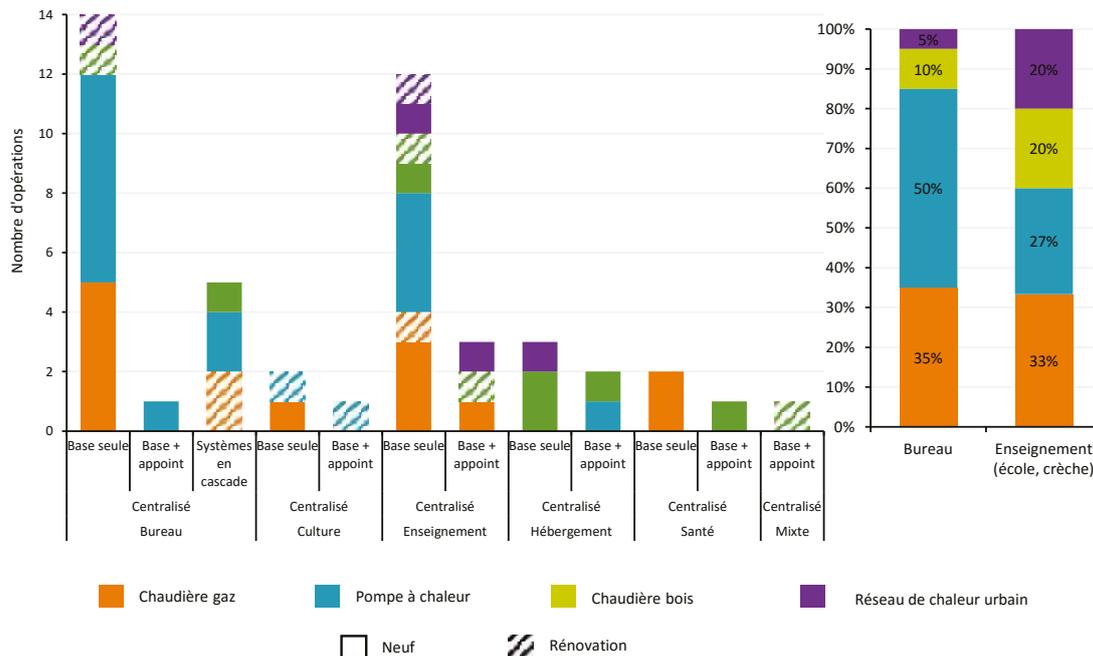


Illustration 117 – Tertiaire : répartition des différents types de production de chaleur



Comme le montrent les illustrations 116 et 117, quelle que soit la fonction du bâtiment, le chauffage est majoritairement produit avec un seul système (73 % de l'échantillon)²². Dans une moindre mesure, les chaufferies sont constituées de systèmes en base + appoint (21 % de l'échantillon) ou, pour l'habitat collectif et les bureaux, de systèmes en cascade (6 % de l'échantillon). Globalement, le fonctionnement des chaufferies est plutôt simple, mais dans certains cas la chaufferie devient tellement compliquée que le gestionnaire, voire le chauffagiste, ne parviennent pas à régler ou optimiser le système.

Pour un EHPAD en Lorraine :

« La chaufferie est complexe. Il y a trois sources de chaleur : des panneaux solaires thermiques, une chaudière à condensation et une PAC ; et il y a trois types d'émission : une boucle d'ECS, des batteries chaudes dans les CTA et des planchers chauffants/rafraîchissants.

Pour le chauffage/rafraîchissement, le bureau d'études a prévu trois modes de fonctionnement : en hiver, la chaudière gaz seule fournit la chaleur pour les batteries chaudes et les planchers chauffants ; en mi-saison, la PAC prend seule le relais pour produire la chaleur des deux émetteurs ; en été, la PAC produit l'eau froide pour les planchers rafraîchissants.

Pour l'ECS, quelle que soit la saison, la chaleur est fournie par les panneaux solaires et la chaudière gaz à condensation. »

Illustration 118 – Partie de la chaufferie de l'EHPAD en Lorraine



22. Parmi les systèmes en « base seule », on retrouve des PAC sur air (air/air ou air/eau). Le système de pompe à chaleur sur air extérieur ne pouvant pas apporter seul la puissance nécessaire lorsque la température extérieure est très faible, un appoint électrique est inclus dans ces systèmes.

5.1.2 Consommation de chauffage

La consommation, mesurée en énergie primaire, de chauffage²³ des logements collectifs s'étend de 14,2 kWh_{ep}/m².an à 108 kWh_{ep}/m².an avec, en moyenne, une consommation de 53 kWh_{ep}/m².an (Illustration 119). Cette grande plage de consommation s'explique par la multitude de paramètres dont dépend la consommation de chauffage : météo, performance de l'enveloppe, performance des systèmes, scénario d'occupation...



Ainsi pour le logement collectif LC.27.H1c.R.x en Bourgogne :

« Notons que ces dernières [consommations de chauffage] pourraient être largement diminuées par abaissement des températures de consigne dans les logements (notamment par action sur la loi d'eau du régulateur en sous-station). »

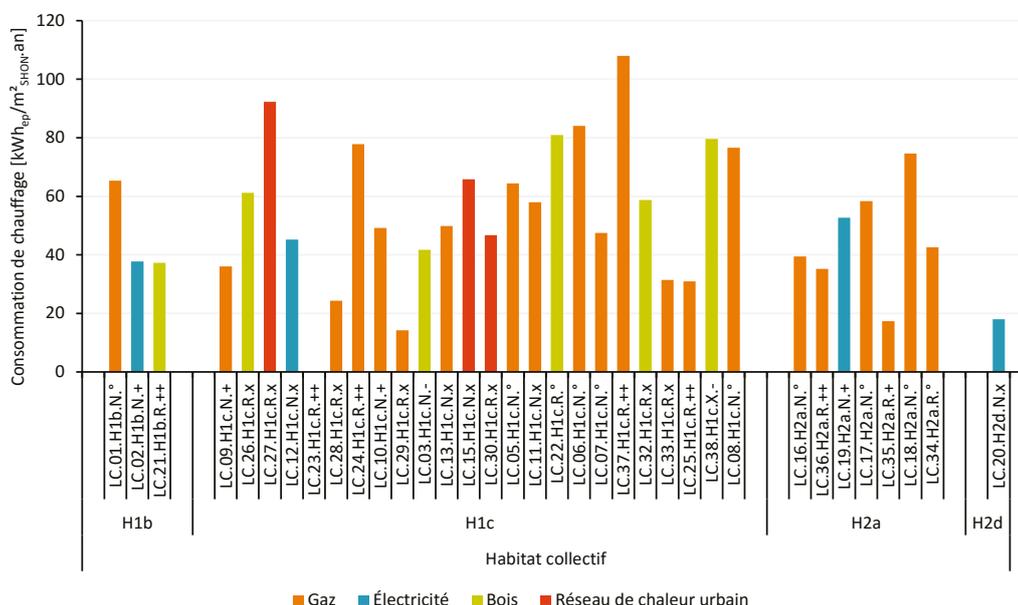
En maison individuelle, les consommations de chauffage s'étendent de 1,39 kWh_{ep}/m².an à 88,41 kWh_{ep}/m².an, avec une moyenne à 36,9 kWh_{ep}/m².an (Illustration 120).



Pour les deux maisons individuelles groupées, MI.29.H2a.N.° et MI.30.H2a.N.°, en Bretagne (consommation respective de 1,63 kWh_{ep}/m².an et 1,39 kWh_{ep}/m².an) :

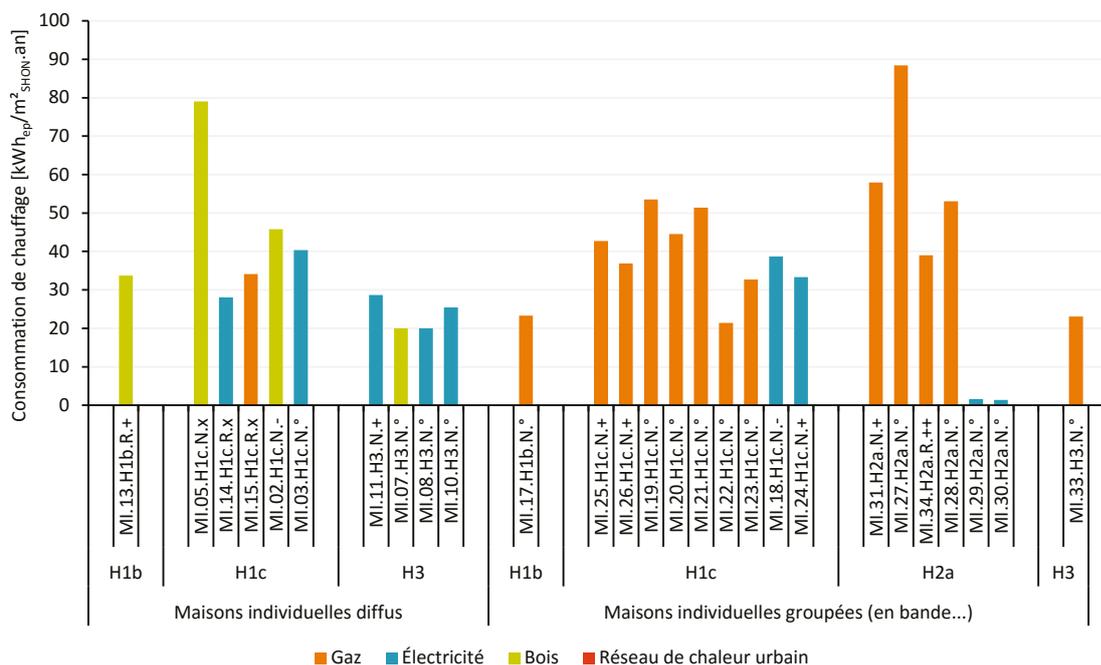
« Pour les deux logements, les consommations de chauffage recherchées sont très faibles : label Passivhaus. Par ailleurs, les apports internes sont très importants : utilisation importante d'appareils audio-visuels. Ainsi les besoins de chauffage sont très faibles et donc les consommations de chauffage sont très faibles. »

Illustration 119 – Consommation de chauffage en habitat collectif



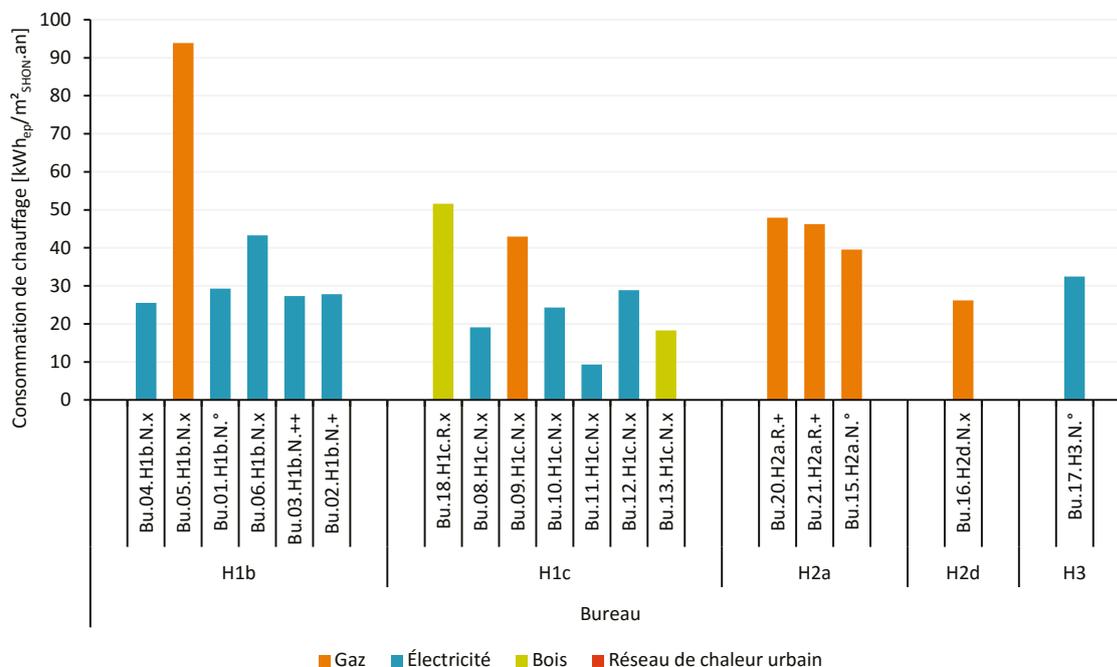
23. La répartition chauffage/ECS est décrite dans la méthode A.4.1. Les coefficients de conversion en énergie primaire sont présentés p. 14.

Illustration 120 – Consommation de chauffage en maison Individuelle



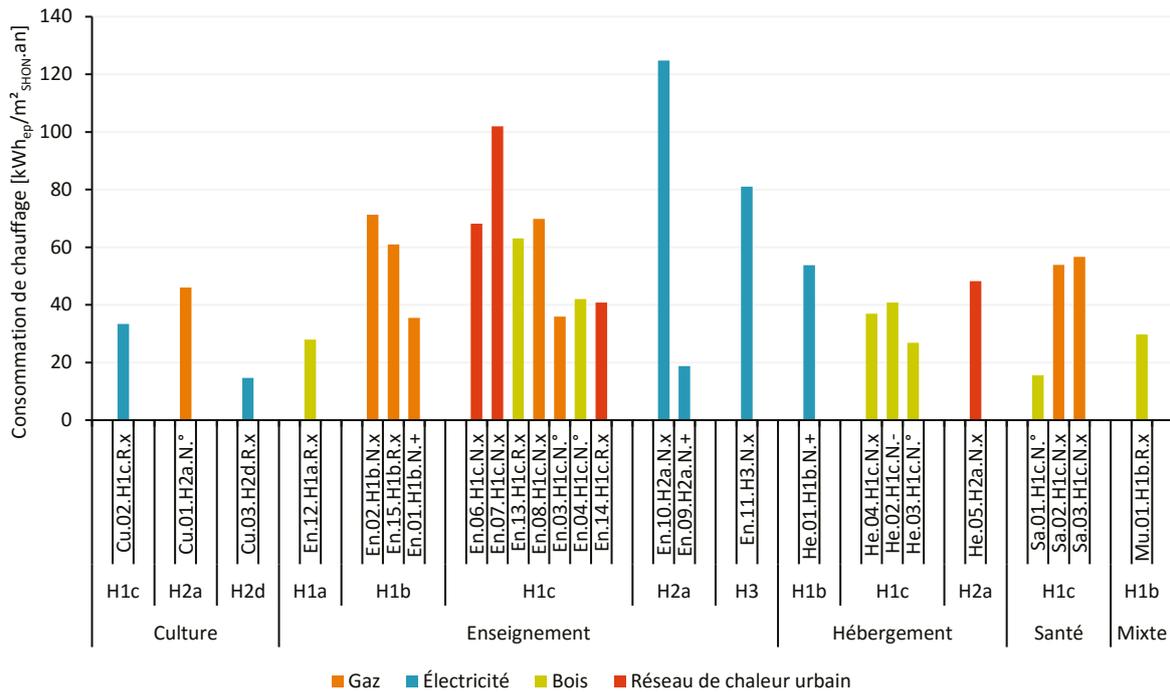
La consommation de chauffage mesurée des bâtiments de bureau varie entre 9,4 kWh_{ep}/m².an et 51,6 kWh_{ep}/m².an avec une moyenne à 32 kWh_{ep}/m².an.

Illustration 121 – Consommation de chauffage en bureaux



La consommation de chauffage des autres tertiaires est très variable. Pour les bâtiments d'enseignement, la consommation de chauffage s'étend de 18,7 kWh_{ep}/m².an à 124,7 kWh_{ep}/m².an avec une moyenne à 60 kWh_{ep}/m².an.

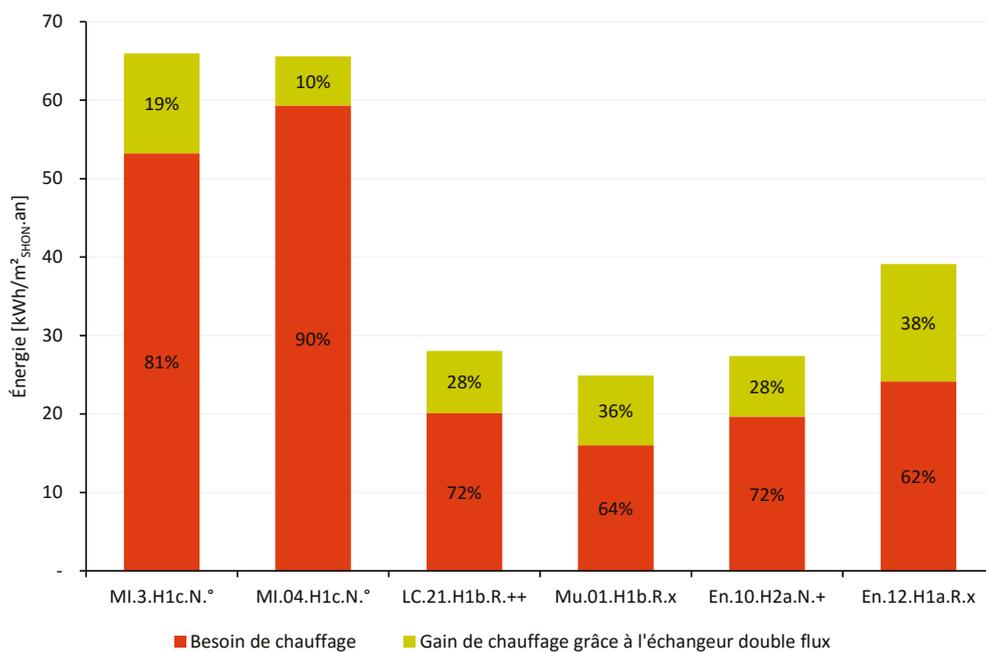
Illustration 122 – Consommation de chauffage en tertiaire autre



5.1.3 Le gain sur le besoin de chauffage lié aux échangeurs des ventilations double flux

Sur plusieurs opérations, des VMC avec échangeurs double flux ont été mises en place pour réchauffer l'air extérieur entrant dans l'enveloppe (§ 5.3.1). La méthode d'évaluation des gains que ces échangeurs ont apportés au besoin de chauffage est donnée au § A.4.2.

Illustration 123 – Comparaison des gains liés à l'échangeur double flux et des besoins de chauffage



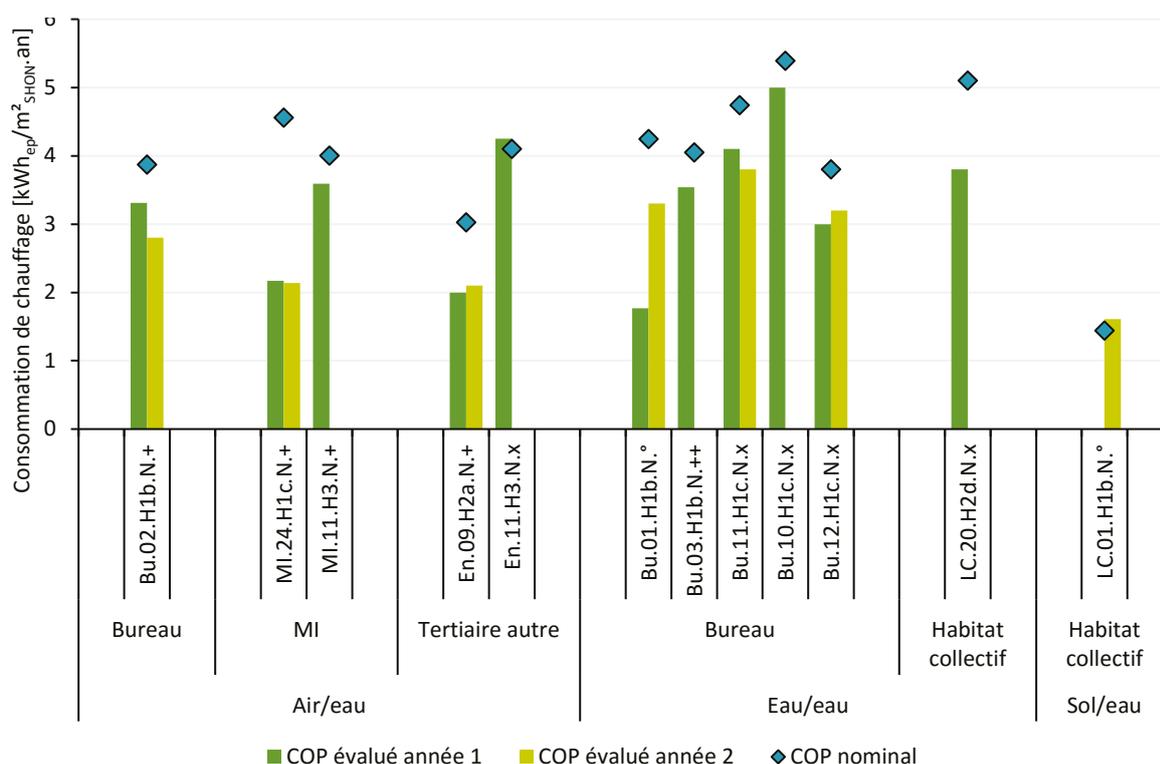
Les gains de chauffage liés à la mise en œuvre d'une VMC double flux se situent autour de 8 - 9 kWh_{ef}/m².an (de 6,3 kWh_{ef}/m².an à 15 kWh_{ef}/m².an). Les échangeurs double flux permettent donc de réduire les besoins de chauffage d'environ 30 %. Ainsi les gains liés aux échangeurs double flux sont non négligeables voire importants pour réduire les besoins et donc les consommations de chauffage, à condition que les débits soient respectés et que les réseaux de ventilation soient correctement mis en œuvre et entretenus (perte de charge, isolation, perméabilité...).

5.1.4 Performance des équipements

Des pompes à chaleur qui fonctionnent souvent en cycles courts

Lorsque l'énergie consommée et l'énergie produite par la pompe à chaleur ont été mesurées, il a été possible d'évaluer un coefficient de performance (COP) saisonnier. Dans aucun des cas, il n'a été possible de séparer les consommations des circulateurs et des ventilateurs pour les PAC, voire des pompes de relevage des capteurs horizontaux, de la consommation du compresseur de la PAC. Ce COP saisonnier comprend donc toutes les consommations citées ci-avant.

Illustration 124 – COP saisonnier évalué à partir des mesures et COP nominal



Même si le COP saisonnier des PAC air/eau est légèrement inférieur au COP saisonnier des PAC eau/eau, les COP saisonniers mesurés lors des différentes années de suivi sont proches de 3, voire atteignent 4-5 pour les meilleurs systèmes.

Dans trois cas sur quatre, le COP mesuré est plus performant lors de la deuxième année que lors de la première. Un hiver moins rude et/ou le réglage de la PAC permettent d'améliorer ses performances.



Pour le bâtiment de bureau Bu.01.H1b.N.° de l'illustration 124:

« Durant l'été 2011, des vérifications ont été faites sur le bon fonctionnement du système couplé PAC/résistance d'appoint. »

La PAC sol/eau installée dans un logement collectif est une PAC à absorption gaz dont le COP nominal est faible (valeur saisie dans le calcul réglementaire de 1,44).



Le COP nominal saisi dans le calcul RT et le COP saisonnier mesuré ne sont pas définis avec les mêmes conditions: les températures amont et aval; les circulateurs; les cycles marche/arrêt...

En effet, le COP nominal affiché dans les brochures des fabricants et repris dans le calcul RT est issu d'essais réalisés en laboratoire. Les conditions de température amont et aval sont alors fixées par des normes ou des protocoles d'essais (par exemple, pour une PAC air/eau on se place aux températures 7/35). De même, les machines sont testées en régime permanent.

Pour obtenir le COP saisonnier à partir des mesures, on fait le rapport de l'énergie produite par la PAC sur l'énergie utilisée. Sur le terrain, les températures et le régime ne sont pas identiques à ceux des normes et les mesures sont réalisées sur l'ensemble de la saison de chauffe.



Outre les différences de conditions dans lesquelles le COP a été mesuré, des cycles courts sont couramment observés; ils sont souvent liés à un surdimensionnement du système au regard de besoins de chauffage fortement réduits. Un ballon tampon (mis en œuvre dans cinq opérations sur les dix présentées) permet de limiter ces cycles trop courts qui dégradent fortement le COP et peuvent détériorer le compresseur (surchauffe).

Enfin, pour les PAC air/eau ou air/air, les besoins réduits de chauffage les amènent également à fonctionner plus souvent lorsque les températures extérieures sont basses, températures pour lesquelles le COP est dégradé. Dans au moins un cas de bureau, le climat du nord-est de la France n'est pas favorable au fonctionnement de la PAC air/eau.

Pour un immeuble de bureau en Lorraine, Bu.02.H1b.N. + dont le COP nominal vaut 3,87 et le COP saisonnier vaut 3,31 (An 1) et 2,8 (An 2):

« Les performances de la pompe à chaleur air/eau sont faibles: le climat rude du nord-est de la France pénalise significativement le COP de ce type de pompe à chaleur qui ne semble pas être le système de chauffage le plus efficace. »

À retenir

Le coefficient de performance moyen mesuré sur la saison (COP saisonnier) des pompes à chaleur (PAC) est supérieur à 3 pour la plupart, voire très supérieur avec un bon réglage des systèmes ou un choix judicieux de technologie.

Des PAC air/eau sont installées en climats froids, lesquels ne constituent pourtant pas un environnement propice à l'atteinte des meilleures performances. Celles-ci se dégradent d'autant plus que le système est amené à fonctionner plus souvent à ces températures, car les besoins des bâtiments à basse consommation sont réduits.

Les besoins de chauffage réduits amènent aussi les PAC à fonctionner souvent en cycles courts, ce qui dégrade fortement la performance du système global et affecte sa durée de vie. Toutefois ce problème a pu être limité par association d'un ballon tampon.

Des chaudières gaz à condensation qui fonctionnent souvent à faible puissance

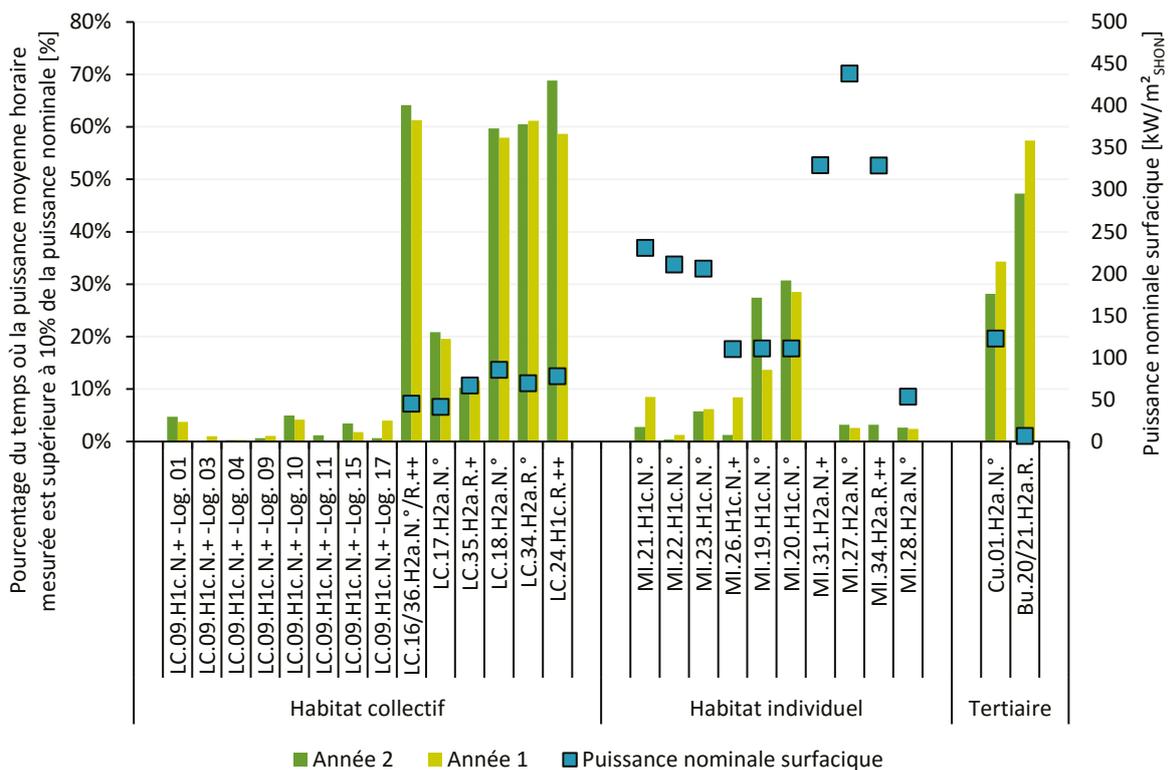


Comme pour les PAC, il est relativement courant d'observer des fonctionnements à faibles charges, du fait d'un dimensionnement souvent dicté par le besoin de produire de l'eau chaude sanitaire instantanément.

En moyenne horaire, les puissances observées n'atteignent pas ou peu souvent la puissance nominale et les chaudières fonctionnent la plupart du temps à des puissances représentant moins de 10 % de la puissance nominale appelée (Illustration 125). Dans ces conditions, les chaudières de l'échantillon fonctionnent sur des cycles courts même en présence d'un brûleur modulant²⁴. Les pertes au démarrage et à l'arrêt sont exacerbées. Lors du choix du brûleur, il est alors important de s'assurer que ce dernier est capable de moduler pour de très faibles puissances.

Dans le cas de chaudières utilisées pour le chauffage seul, une puissance plus faible de chaudière aurait probablement pu être installée. Le marché des chaudières gaz à condensation propose toutefois peu de chaudières à faible puissance. Cependant, les chaudières sont souvent à double usage (chauffage et ECS), ce qui explique les fortes puissances installées.

Illustration 125 – Pourcentage du temps où la puissance atteinte représente plus de 10 % de la puissance nominale



À retenir

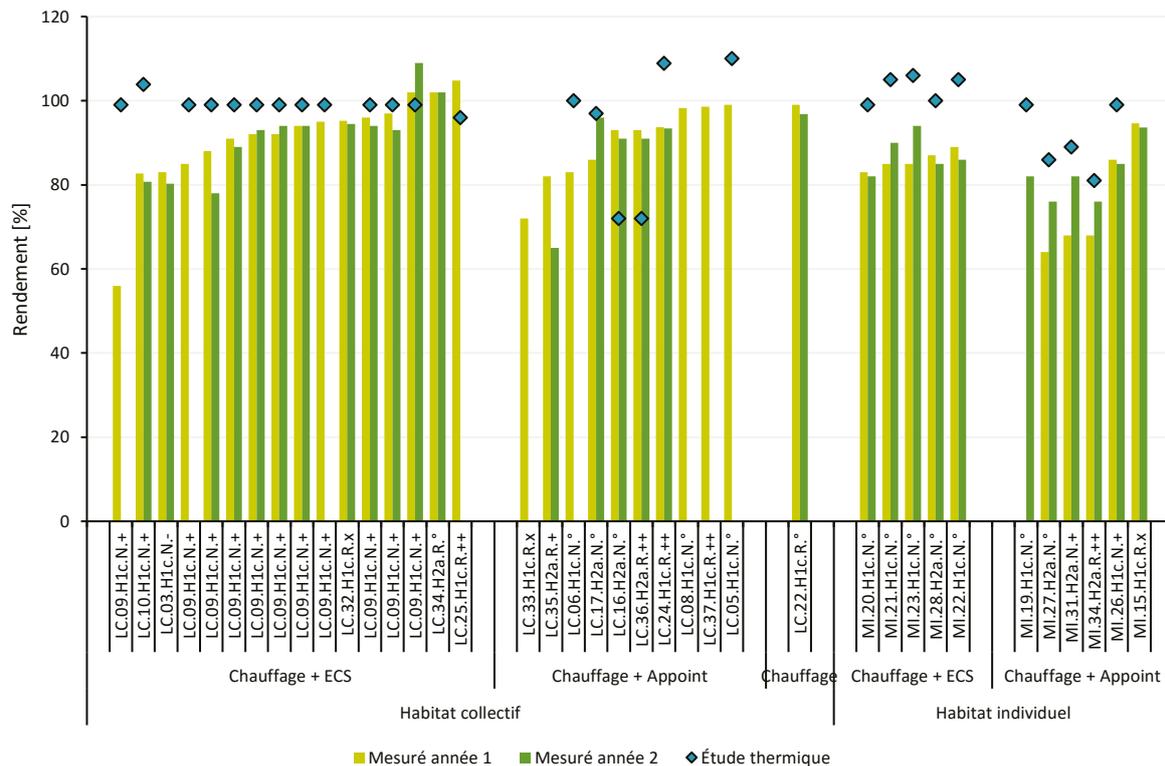
Les besoins de chauffage étant réduits, les chaudières gaz à condensation de l'échantillon fonctionnent souvent à de trop faibles puissances, ce qui dégrade fortement la performance du système et affecte sa durée de vie.

24. N.B. : le rendement d'une chaudière augmente lorsque la puissance appelée diminue jusqu'à un niveau où le rendement chute.

La performance d'une chaudière s'évalue par l'intermédiaire de son rendement²⁵. Lors des suivis d'opération, le rendement saisonnier²⁶ des chaudières gaz à condensation, qui est bien évidemment différent du rendement nominal²⁷, a été mesuré.

Les rendements calculés tiennent compte de la consommation de chauffage et de la consommation pour la production d'ECS quand la chaudière fournit les deux.

Illustration 126 – Rendement saisonnier des chaudières gaz en logement²⁸



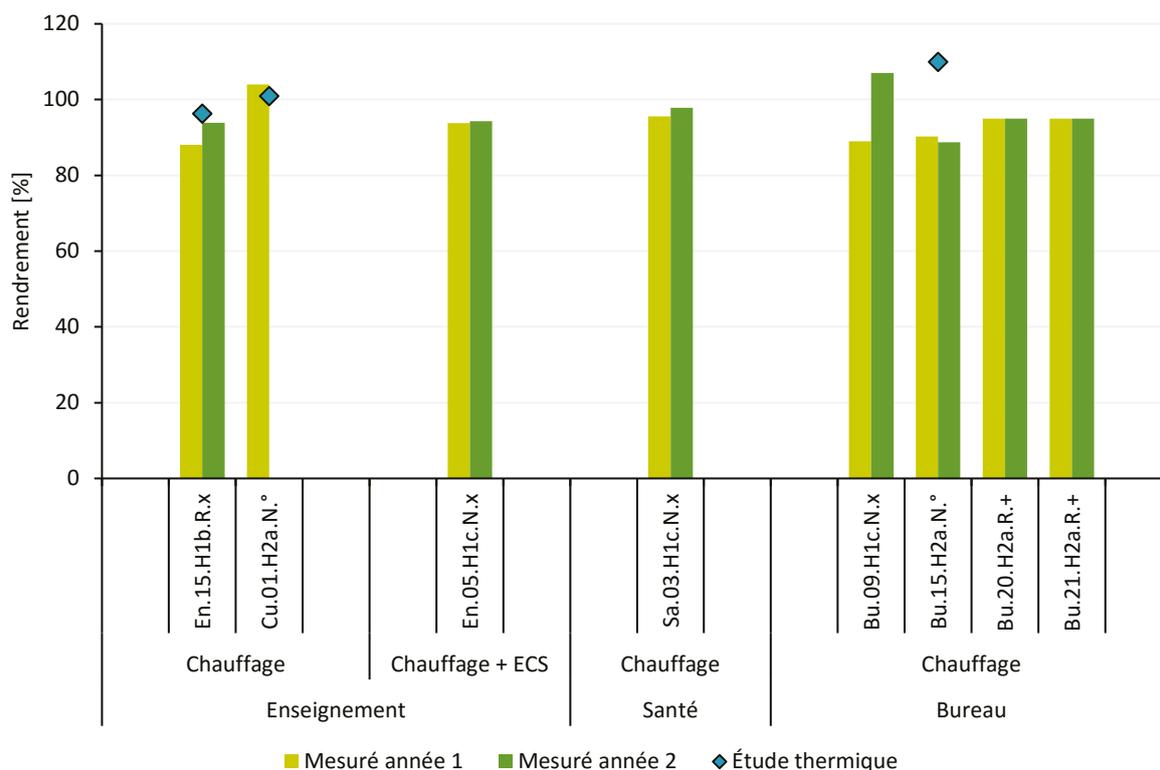
25. Dans notre analyse, nous utilisons le rendement sur PCI.

26. Voir Méthodologie § A.4.3.

27. Le rendement nominal d'une chaudière est établi en laboratoire suivant un protocole décrit par les normes NF D 30, NF EN 297/A2 et NF EN 483/A2.

28. Le rendement RT correspond au rendement à 30 % de charge soit lorsque les fiches xml étaient disponibles à un recalcul du rendement en fonction des résultats de consommations mensuels.

Illustration 127 – Rendement saisonnier des chaudières gaz des bâtiments tertiaires



Les rendements évalués sur PCI sont majoritairement supérieurs à 80 %.

5.1.5 Des réseaux de distribution dont l'isolation pourrait être améliorée



De manière générale, des efforts sur l'isolation des réseaux linéaires hors volume chauffé ont pu être observés sur les opérations. Des progrès sont encore possibles sur l'isolation des pompes et des vannes.

Illustration 128 – Les linéaires de réseaux sont isolés mais pas les organes



À retenir

Les pertes thermiques des réseaux sont encore très importantes, notamment au niveau des organes de régulation.

5.1.6 Des émetteurs de chaleur généralement à basse température

Le radiateur à eau standard reste le premier type d'émetteur choisi dans l'échantillon (36 % des cas). De plus, il est souvent associé à une chaudière gaz à condensation qui nécessite une température de retour faible (30-35 °C) pour condenser. Le radiateur à eau standard, bien que pouvant être utilisé à ces faibles températures, y est moins adapté qu'un radiateur à basse température (développement de puissance plus faible à basse température pour les radiateurs standards).

Le plancher chauffant est le choix numéro deux des maîtres d'ouvrage (un quart de l'échantillon). Il est principalement associé à des pompes à chaleur ou chaudières gaz à condensation afin de profiter de la basse température nécessaire à ces deux systèmes. En revanche, lors de la mi-saison, les besoins de chauffage d'un bâtiment basse consommation étant faibles et ponctuels, la forte inertie du plancher chauffant ne facilite pas le bon confort thermique.

Pour répondre à cette problématique de faibles besoins, principalement observés en mi-saison, plusieurs opérations (11 sur 58) ont fait le choix de mettre en place soit des émetteurs à faible inertie tels que des résistances électriques dans les gaines de ventilation (une opération en habitat collectif) ou des radiateurs électriques (3 opérations en maison individuelle), soit des batteries à eau chaude dans les gaines de ventilation (7 opérations).

À retenir

Un fonctionnement optimal des chaudières gaz à condensation et des PAC est obtenu lorsque la température de départ et de retour est faible. Les radiateurs basse température ou les planchers chauffants facilitent ces conditions.

Les systèmes de chauffage réactifs, notamment avec émetteurs à faible inertie, répondent mieux aux faibles besoins de chauffage observés en mi-saison.

5.1.7. Des systèmes de régulation qui posent parfois des problèmes

Une régulation centrale²⁹ est présente dans l'ensemble des opérations, sauf pour les deux cas utilisant des radiateurs électriques et les deux opérations chauffant avec un poêle à bois. La régulation centrale se fait majoritairement par rapport à la température extérieure. La régulation horaire se fait en général avec un programmateur fixe (55 opérations sur 77 opérations renseignées soit 71 %), mais quatre opérations (soit 5 %) utilisent un optimiseur.

Pour un bâtiment de bureaux en Rhône-Alpes :

« L'installation possède un optimiseur. Rappelons qu'il s'agit d'un micro-processeur déterminant chaque jour, en fonction des températures intérieure et extérieure, de la constante de temps du bâtiment et de très nombreux autres facteurs, à quelle heure l'installation doit redémarrer afin que le bâtiment soit à la température de consigne à l'heure du début d'occupation. »



Les difficultés de régulation observées sont causées par :

- un problème de conception ;

Pour une maison individuelle en Languedoc-Roussillon, bien que réalisée sous la RT2005 :

« Une seule sonde d'ambiance pour toute la maison est insuffisante s'il n'y a pas de régulation terminale. Il fait donc trop chaud au sud ou trop froid au nord. »

- une mauvaise compréhension du fonctionnement du système ou un mauvais équilibrage des réseaux ;

Pour une habitation collective en Lorraine :

« Les températures internes des logements sont bien trop élevées. Il peut y avoir plusieurs raisons à cela dont la méconnaissance du fonctionnement de la régulation du chauffage qui a été mis en avant lors de l'entretien avec les occupants. »

- un mauvais réglage des systèmes.

Les tendances mises en évidence lors de l'exploitation des questionnaires de la méthode complémentaire pour rassembler des informations sociologiques vont également dans ce sens : sur le panel propre à cette étude spécifique, les difficultés liées au système de chauffage dans le résidentiel sont relativement fréquentes. Les détails de l'analyse figurent au § 6.3.

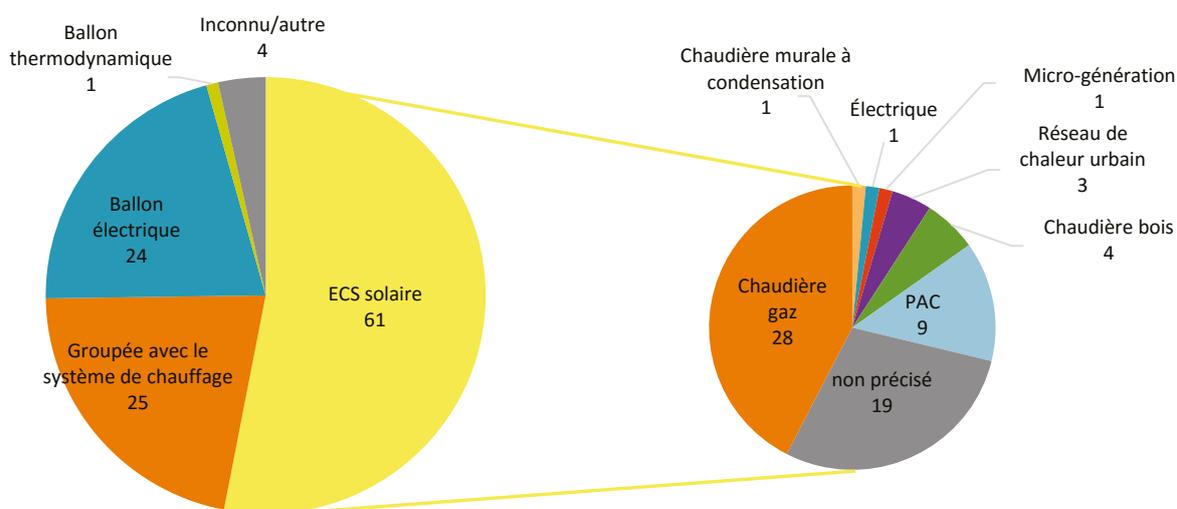
29. La régulation centrale correspond à la régulation commune à plusieurs pièces.

5.2 Eau chaude sanitaire

5.2.1 Des systèmes de production divers

Dans le panel de bâtiments étudiés, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) solaire est très présente (60 bâtiments sur 116). La chaudière gaz en place assure l'appoint dans deux tiers des cas. Dans trois bâtiments d'habitation collective, le complément est assuré par le réseau de chaleur.

Illustration 129 – Répartition des différents types de production d'ECS en habitat et tertiaire



Moins de la moitié des bâtiments de l'échantillon ne font appel qu'à un seul type de production d'ECS. Il s'agit généralement des habitations individuelles, pour lesquelles on retrouve une production d'ECS liée au chauffage gaz et plus rarement, à une chaudière bois ou à un ballon électrique.

Les installations combinant deux systèmes s'organisent autour d'une base (généralement l'ECS solaire) et d'un appoint pouvant être au gaz ou avec un ballon électrique, et plus rarement un réseau de chaleur urbain ou une chaudière bois.

Dans certains bâtiments, le mode de production change en fonction de la saison : l'ECS est produite en hiver via la chaudière bois, et en été une chaudière gaz ou une résistance électrique prend le relais de la production.

Sur l'ensemble de l'échantillon, les systèmes à accumulation prédominent. On ne trouve de l'ECS instantanée que dans les logements équipés de chaudières gaz individuelles. Seuls une maison individuelle et trois bâtiments collectifs utilisent la production d'ECS instantanée.

La majorité des opérations de logements collectifs et de maisons individuelles ont recours à l'ECS solaire avec un appoint. Dans les bâtiments collectifs, ce choix a pour conséquence la centralisation des équipements de production, avec des volumes de stockage importants et, comme pour toute production non individuelle, de longs réseaux de distribution et du bouclage.

Dans le tertiaire, et particulièrement dans les bureaux et les établissements scolaires où les besoins sont faibles, le recours aux ballons électriques décentralisés prédomine.

En ce qui concerne la distribution entre la production et le puisage, deux cas de figure sont représentés :

- la production en volume habitable chauffé. Elle est rencontrée en maison individuelle (19 opérations sur 20), et en tertiaire (8 opérations sur 12) ;
- la production centralisée hors volume chauffé avec bouclage. Elle est très fortement représentée en logement collectif (15 opérations sur 19) ;

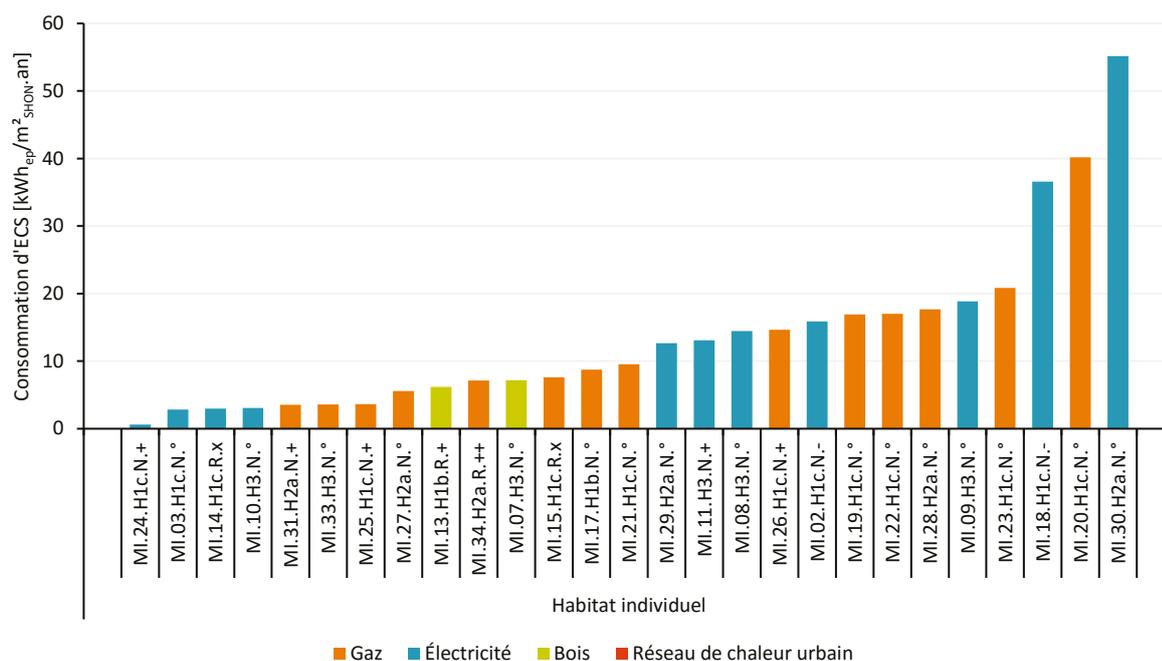
5.2.2 Des consommations d'énergie très variables

Les consommations d'énergie pour la production d'ECS³⁰ sont très variables en fonction des opérations et de leur fonction principale.

Dans les maisons individuelles

La consommation peut monter jusqu'à plus de 50 kWh_{ep}/m².an. Mais dans la plupart des cas elle se situe entre 8 et 14 kWh_{ep}/m².an.

Illustration 130 – Consommation mesurée d'eau chaude sanitaire en maison individuelle



Sur une opération, les consommations sont très élevées et anormales. Elles atteignent 51 kWh_{ep}/m².an. Cette très forte consommation est due à un dysfonctionnement de l'ECS solaire, chauffée par l'appoint.

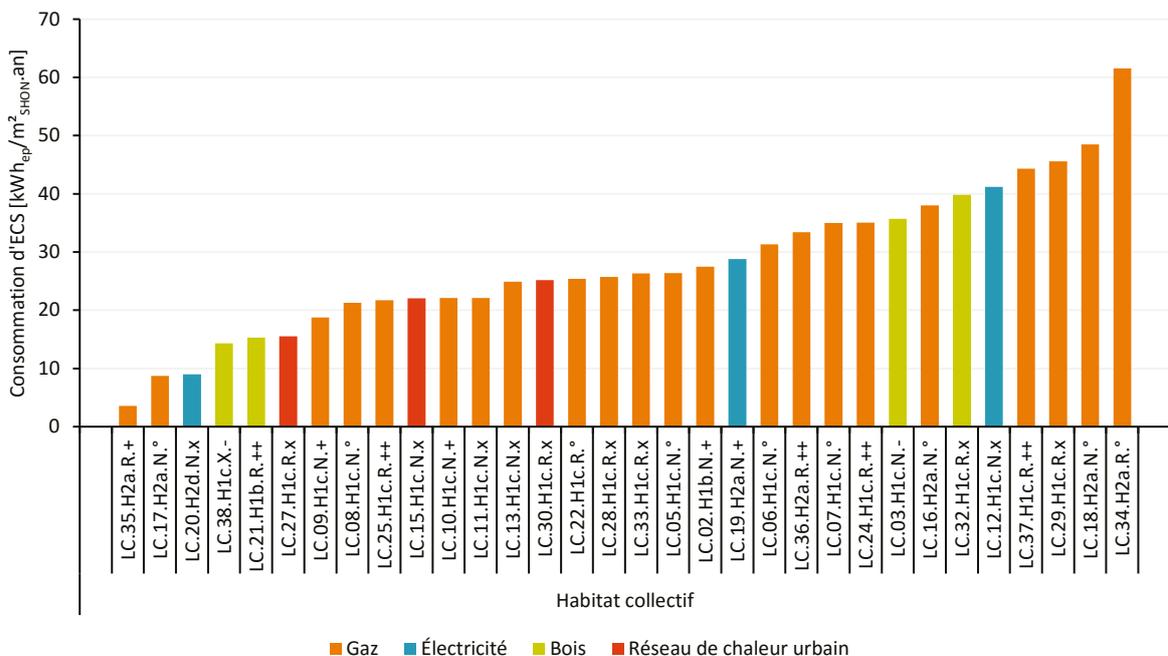
30. Pour les systèmes réalisant à la fois le chauffage et l'ECS, la répartition des consommations a été réalisée selon la méthodologie présentée au § A.4.2.

En habitat collectif

La consommation mesurée est globalement supérieure à la consommation rencontrée en maison individuelle, et située pour la plupart des opérations entre 20 et 30 kWh_{ep}/m².an.

La proportion d'opérations utilisant du solaire est la même en maisons qu'en logements collectifs.

Illustration 131 – Consommation mesurée pour la production d'eau chaude sanitaire en habitat collectif



Les pertes liées à la distribution et au bouclage sont également responsables des fortes consommations de ces opérations.

Les pertes par bouclage ont été évaluées pour un seul cas :

« Les pertes par bouclage représentent dans cette opération 33 % des consommations d'ECS. Sur cette opération, le bouclage est isolé. Mais il est très long et présente de nombreuses ruptures du calorifugeage. »



L'écart entre logement collectif et logement individuel vient probablement d'une occupation plus dense en logements collectifs qu'en maison individuelle. Les consommations ramenées au m² sont alors défavorables au logement collectif.

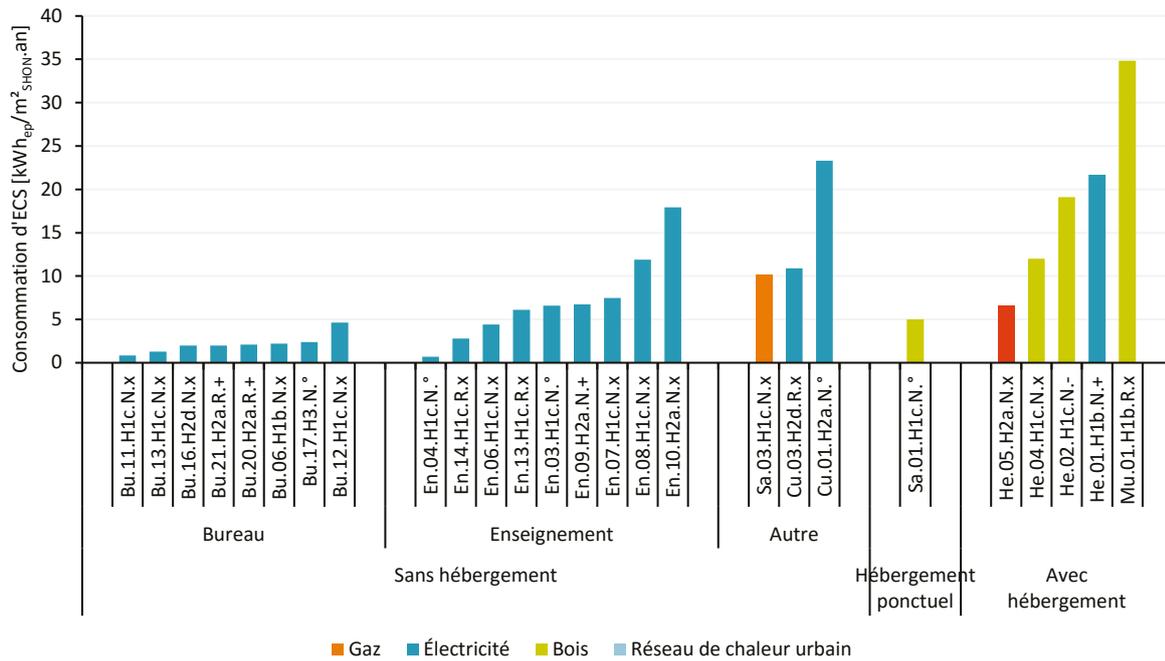
Dans les bâtiments tertiaires

Les consommations sont variables selon la fonction principale du bâtiment. Mais elles sont logiquement plus faibles qu'en logement dans la majorité des cas.

Bien que les besoins en ECS de ces bâtiments ne soient pas pris en compte par la réglementation thermique 2005 (à l'exception des crèches et des bâtiments de santé), la mesure montre que leurs consommations sont loin d'être négligeables (supérieures à 10 kWh_{ep}/m².an dans plusieurs cas).

La présence d'hébergement dans les locaux engendre des consommations d'ECS plus élevées que dans les autres bâtiments tertiaires, et proches des consommations des logements individuels.

Illustration 132 – Consommation mesurée pour la production d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments tertiaires avec ou sans hébergement



5.2.3 Zoom sur l'ECS solaire

Dimensionnement

Le dimensionnement des panneaux solaires est souvent compris entre 2 et 4 m² de panneaux pour 100 m² de SHON en maison. En logement collectif, les surfaces installées sont plus variables, avec de nombreuses valeurs comprises entre 1,5 et 2 m² de panneaux /100 m² SHON.

Illustration 133 – Surface de panneaux solaires installés pour 100 m² de SHON

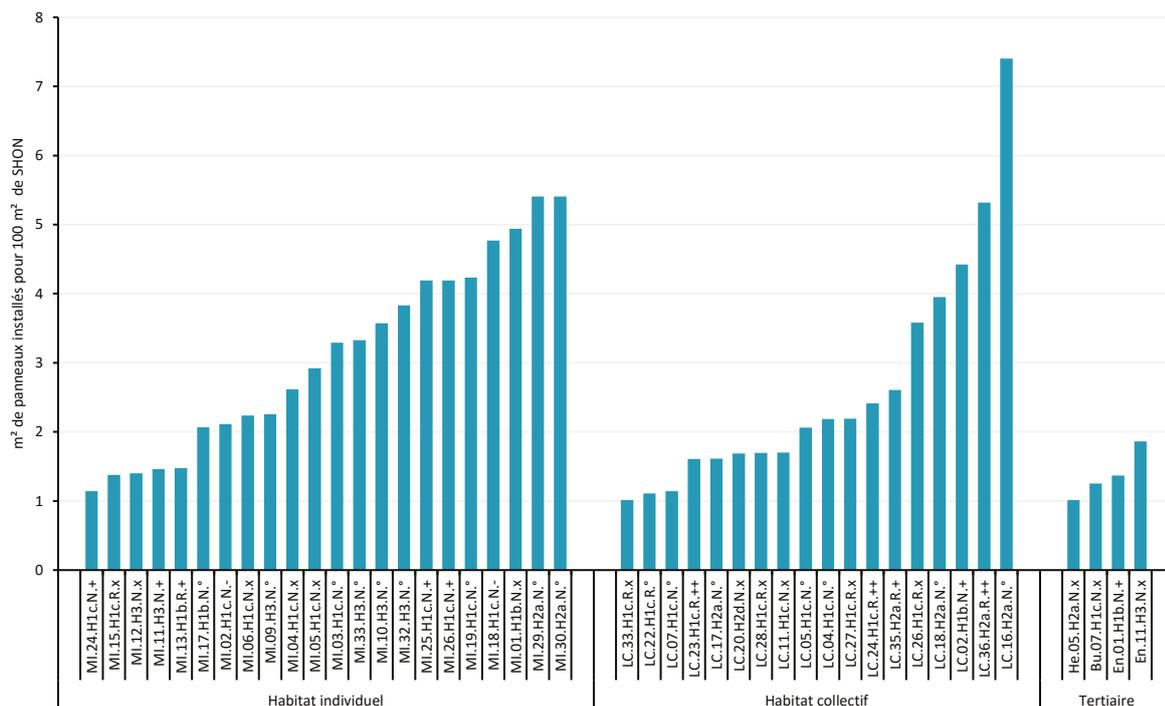
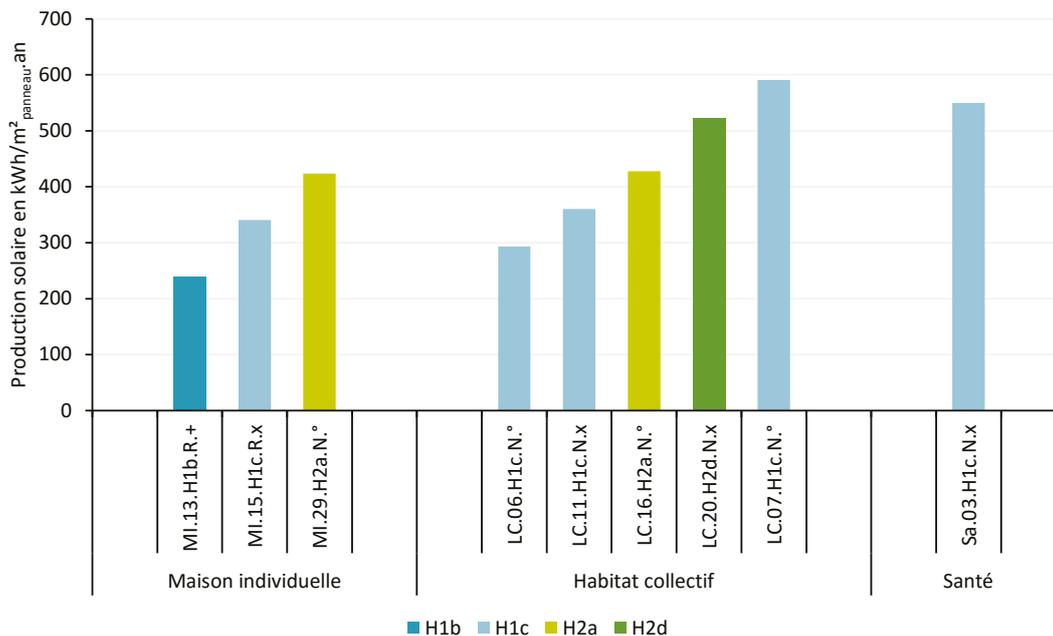


Illustration 134 – Production solaire en kWh/m²panneaux.an

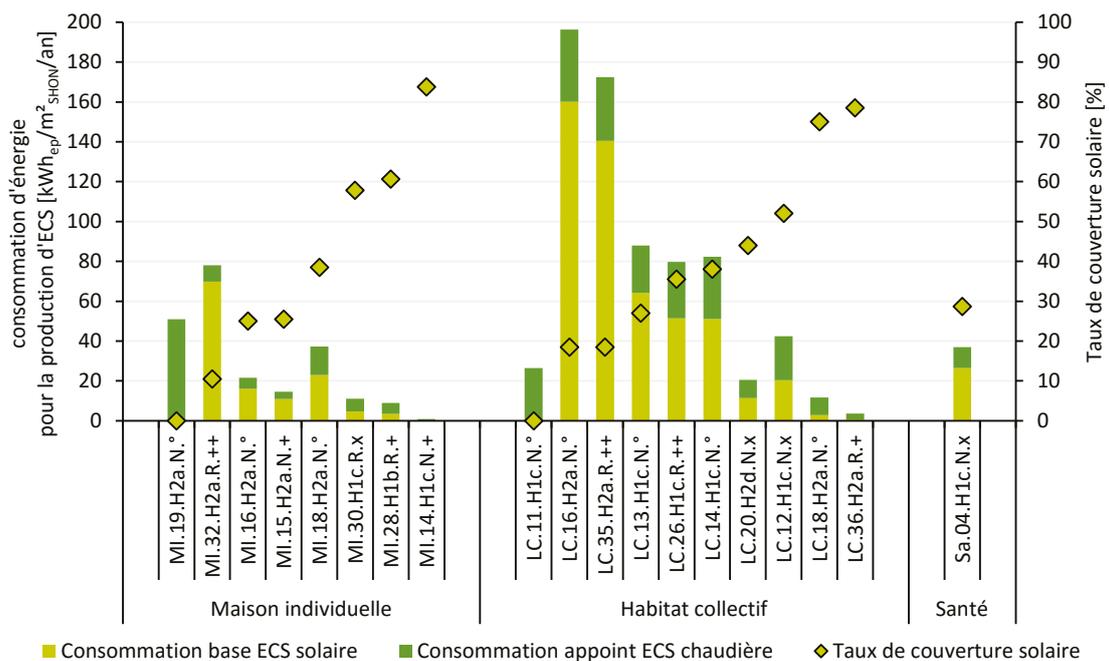


La production annuelle solaire en fonction de la surface de panneaux installée est disponible pour neuf opérations. La production est comprise entre 240 et 591 kWh/m²panneaux.an. Pour une majorité des installations, elle est comprise entre 350 et 550 kWh/m²panneaux.an.

Couverture solaire

Les dimensionnements différents d'une opération à l'autre, l'usage, la zone géographique et les dysfonctionnements repérés aboutissent à un taux de couverture solaire³¹ variable.

Illustration 135 – Taux de couverture solaire



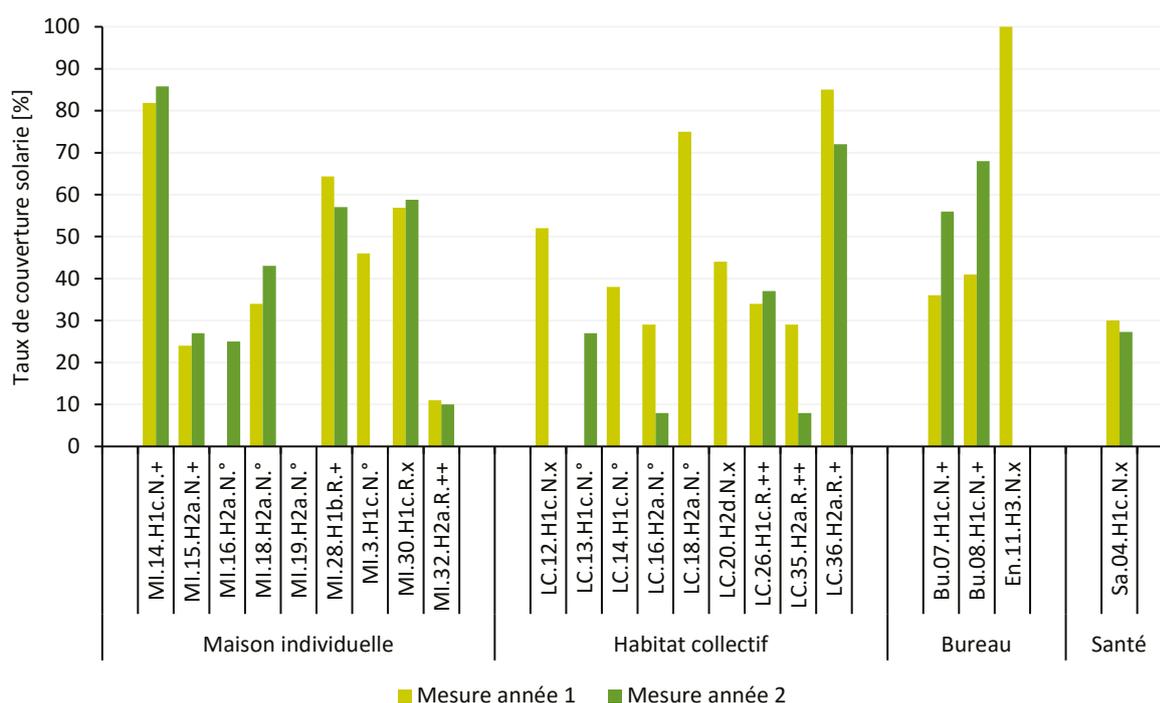
31. Voir la méthodologie A.4.5.

En Rhône-Alpes, les taux de couverture solaire se situent entre 40 et 60 %. La dispersion est plus forte en Bretagne, où plusieurs projets affichent un taux de couverture solaire autour de 25 %, mais avec des écarts allant de 10 à 90 %. Un projet en Languedoc Roussillon affichait un taux de couverture solaire de 100 %, mais a été sorti de l'échantillon, ce taux résultant d'une panne du système d'appoint.

Le taux de couverture est variable d'une année à l'autre.

C'est le cas sur au moins 3 des opérations présentées sur l'illustration 136. Ces chutes sont souvent dues à des dysfonctionnements (voir partie suivante).

Illustration 136 – Les taux de couverture solaire observés sur les années 1 et 2



Points de vigilance sur les installations d'ECS



Dans quelques opérations, les consommations pour la production d'ECS sont importantes, notamment pour certaines installations solaires.

Les schémas ci-après reprennent et expliquent certains de ces dysfonctionnements, pour montrer les erreurs faites sur ces opérations à ne pas répéter.

De nombreuses installations solaires ont à l'inverse très bien fonctionné, permettant d'abaisser significativement les consommations de production d'ECS.

Les remarques qualitatives expliquent bien les écarts de performance rencontrés : de faibles besoins et un appoint ne fonctionnant pas.

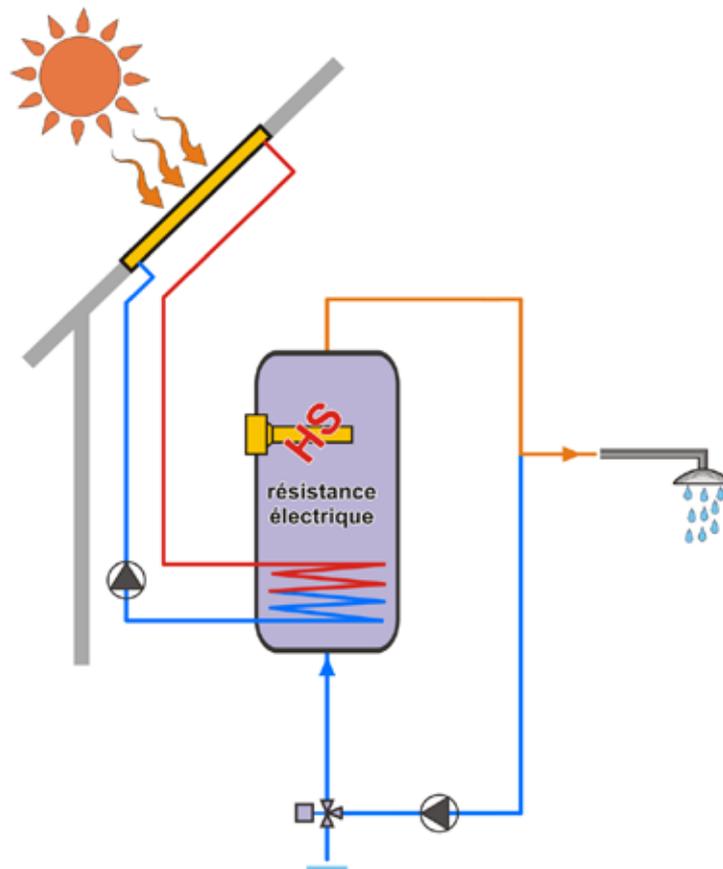
Pour un bâtiment d'enseignement :

« **L'appoint électrique de l'ECS solaire n'a jamais marché.** En effet, les besoins en ECS sont très inférieurs à ceux prévus dans la note de calcul, d'où une installation solaire surdimensionnée et une couverture de 100 % par celle-ci. »

Pour un bâtiment de logements (explicité par l'illustration 137) :

« Le retour de l'enquête a montré que l'ECS n'est pas toujours assez chaude. Le besoin paraît alors couvert à 100 % par le chauffage solaire. Mais c'est la résistance d'appoint qui ne fonctionne pas, sans que l'on s'en soit rendu compte. »

Illustration 137 - Dysfonctionnement de la résistance d'appoint



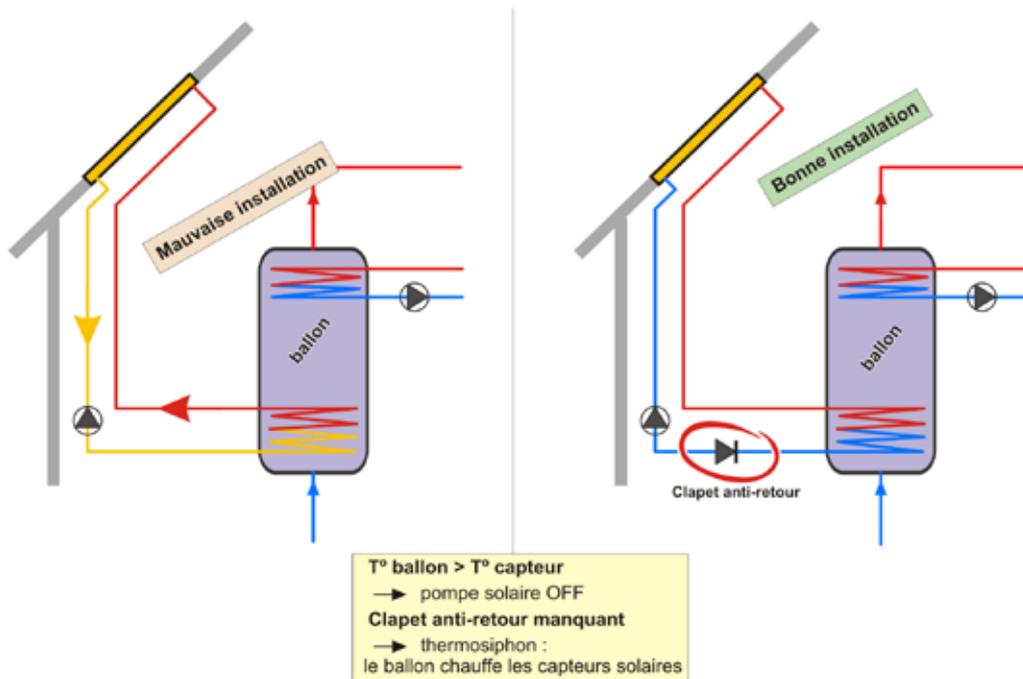
En maison individuelle, le plus gros dysfonctionnement des installations solaires est dû à l'absence d'un clapet anti-retour.

« **Il n'y a pas de clapet anti-retour** (Illustration 138). Lorsqu'il n'y a pas de production solaire, les pompes s'arrêtent, et le circuit solaire refroidit.

Il reste chaud au niveau de l'échangeur noyé dans le ballon, où la température est maintenue par l'appoint. Il y a alors un effet de thermosiphon, et l'appoint chauffe le circuit solaire.

Dans un cas de l'échantillon, ce dysfonctionnement est responsable d'une consommation annuelle de 51 kWh_{ep}/m².an. »

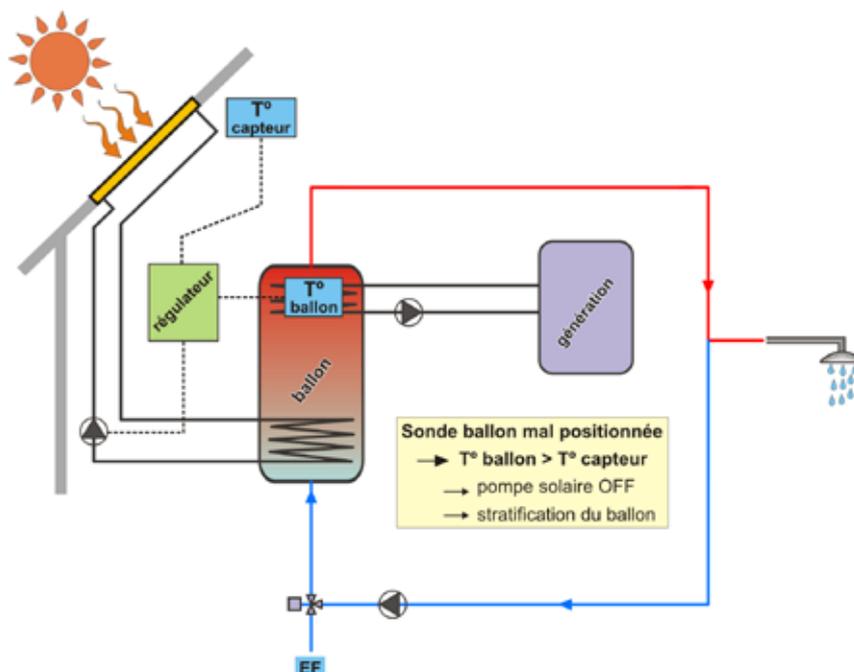
Illustration 138 – Absence de clapet anti-retour sur le circuit solaire



Les systèmes solaires utilisés en habitat collectif imposent souvent l'emploi du stockage centralisé et du bouclage (comme pour toute production non individuelle). Ces deux techniques ne sont pas toujours maîtrisées, et de nombreux dysfonctionnements sont relevés.

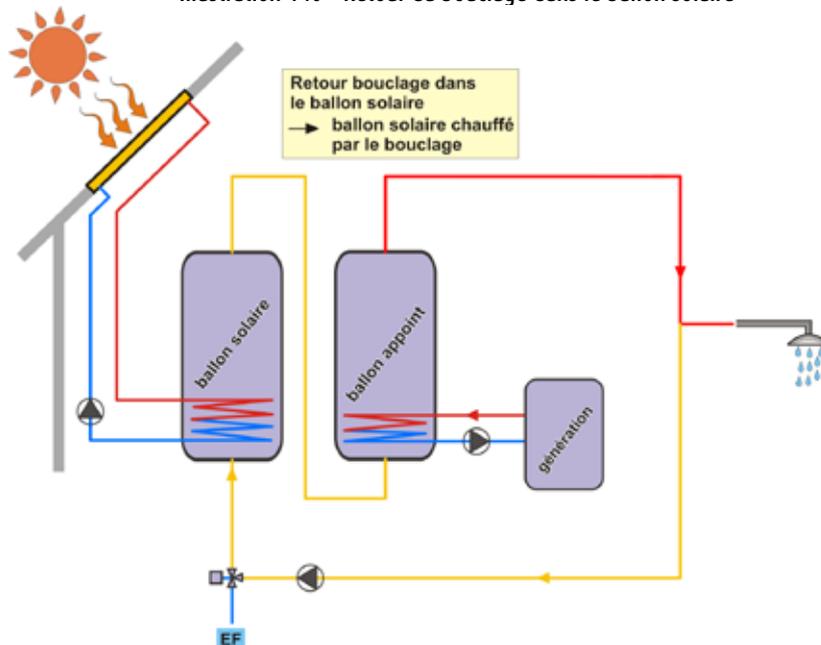
« **La sonde du ballon solaire est mal placée** et l'échange thermique dans le ballon ne se fait que dans la partie haute du ballon (Illustration 139). Le stockage d'énergie n'est utilisé qu'à moitié et les pompes des panneaux solaires s'arrêtent prématurément. Il s'ensuit un faible apport solaire et une surchauffe des panneaux l'après-midi, car la régulation considère que le stockage est rempli. »

Illustration 139 – Mauvais placement de la sonde du ballon solaire



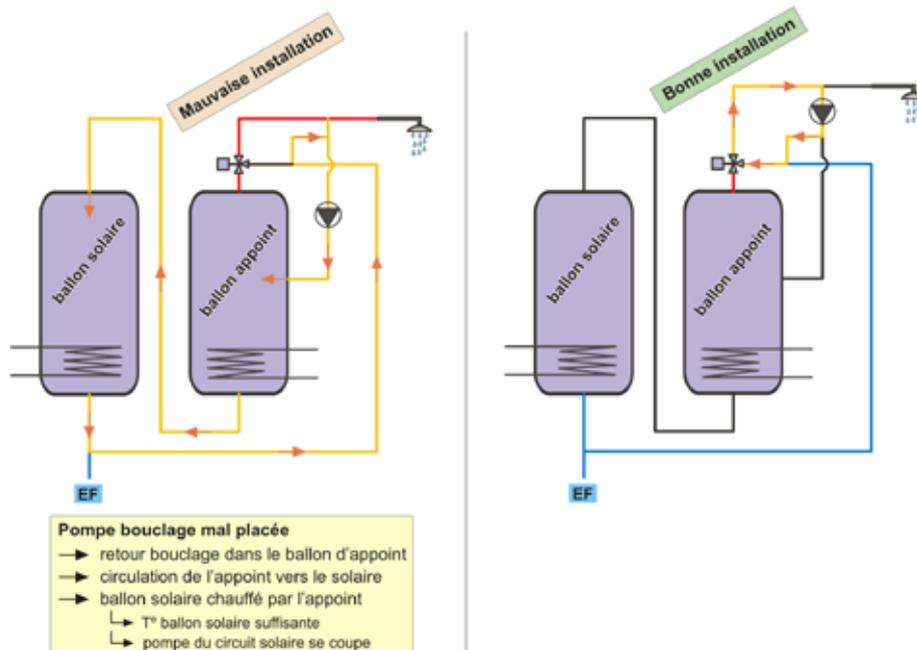
« Le **bouclage** revient directement sur le **ballon solaire** (Illustration 140). Il est alors réchauffé par celui-ci. Il n’y a plus de besoins, et la pompe solaire se coupe. »

Illustration 140 – Retour du bouclage dans le ballon solaire



« La **pompe de bouclage** n’est pas placée avant le **retour bouclage** sur le mitigeur et il n’y a pas de clapet anti-retour sur le retour ECS. Le ballon solaire est alors maintenu en température par le retour ECS, et il n’y a pas ou peu d’apports solaires. »

Illustration 141 – Mauvais positionnement de la pompe de bouclage

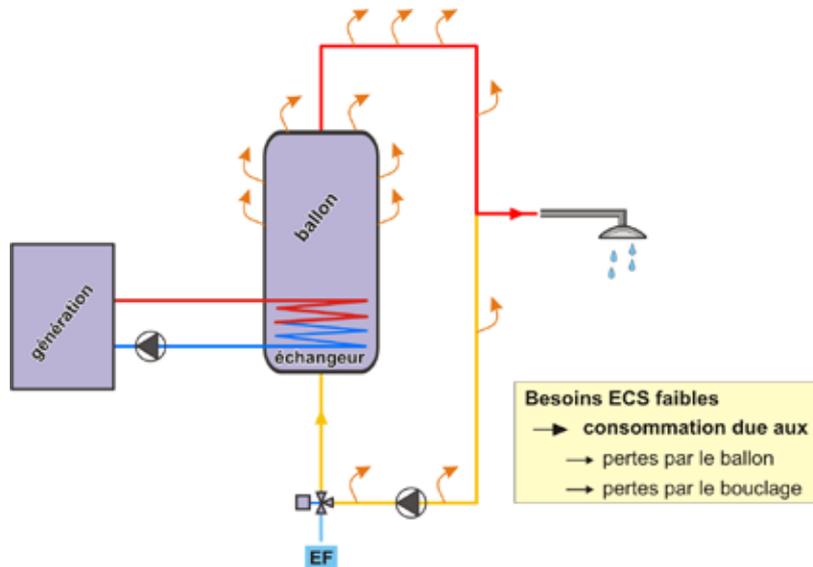


En complément sur les dysfonctionnements repérés lors des instrumentations sur l’échantillon, le syndicat de professionnels de l’énergie solaire a publié le guide *Production d’eau chaude sanitaire solaire thermique collective – Schémas de principes*, en libre-service sur internet.

Outre les pertes liées au bouclage, le dimensionnement des ballons de stockage est aussi pointé du doigt :

« La production solaire a juste permis de compenser les pertes de température de l'eau stockée dans le ballon d'appoint sans élévation de la température. Ces pertes sont de deux ordres : le refroidissement du ballon et surtout les pertes de bouclage. Alors que les besoins sont très faibles par rapport au dimensionnement. »

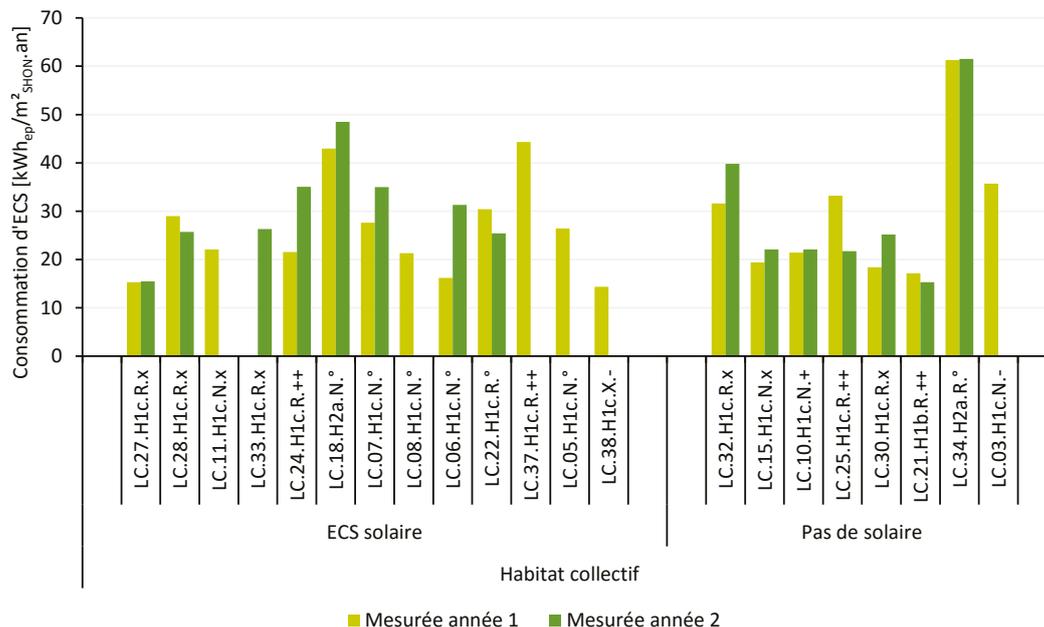
Illustration 142 - Pertes de bouclage et de stockage



Dans les logements collectifs, les consommations pour la production d'ECS ne sont pas forcément plus faibles lorsqu'il y a une installation solaire (Illustration 143), la consommation dépendant en premier lieu du puisage. Les pertes de bouclage peuvent aussi être à l'origine de cette observation.

Sur certaines opérations isolées, on a également des dysfonctionnements sur les équipements solaires ne permettant pas un fonctionnement optimal.

Illustration 143 - Consommation mesurée pour la production d'eau chaude sanitaire dans les logements collectifs, avec et sans installation solaire



5.2.4 Des distributions aux pertes non négligeables

Les mesures de consommation pour la production d'ECS montrent une nette tendance à la surconsommation des installations centralisées au regard de celles mettant la production au plus près du puisage. Les longueurs importantes des réseaux de distribution, le bouclage, voire le volume des ballons de stockage dimensionnés pour faire face à des pics de besoins, engendrent des pertes de distribution conséquentes, auxquelles il faut ajouter les consommations électriques des auxiliaires de circulation : circuit solaire primaire, bouclage ECS.

Ces constats sont récurrents sur plusieurs opérations. Une isolation plus conséquente pourrait être envisagée aussi bien au niveau du stockage que de la distribution. Dans certains cas, les pertes de bouclage sont équivalentes au besoin, elles représentent alors 50 % de la consommation pour la production d'ECS.



Ces pertes de bouclage découlent également d'une probable surestimation des besoins d'ECS dans le bâtiment. Si les besoins sont plus faibles que prévu, les pertes de bouclage augmentent en proportion.

Dans des habitats collectifs en Rhône-Alpes :

« Dans la mesure où le puisage de l'eau chaude sanitaire est ponctuel, voire nul en cas d'inoccupation, les pertes de bouclage (en collectif) sont continues. Or les distributions et tous leurs points singuliers sont insuffisamment isolés, et des ponts thermiques sont observés au niveau des colliers, vannes, compteurs... »



Si le bouclage est généralement calorifugé, son isolation est bien souvent discontinu au niveau des pompes et des vannes, et sa longueur reste importante. Bien souvent, la distribution finale en volume chauffé avant le puisage n'est pas isolée :

Pour un habitat collectif rénové :

« Le bouclage de distribution de l'ECS est très long et très déperditif bien qu'isolé (il représente 65 % des consommations de la production d'ECS). Compte tenu de ce bouclage, une des deux chaudières est constamment en mode fourniture d'ECS. »

Pour un habitat collectif neuf, avec production collective et réseau bouclé :

« La demande en eau chaude sanitaire a baissé de 8 % entre l'année 1 et l'année 2. Les pertes de bouclage ont alors augmenté, faisant baisser à 41 % la part de consommation d'ECS liée au puisage. »

En maisons individuelles :

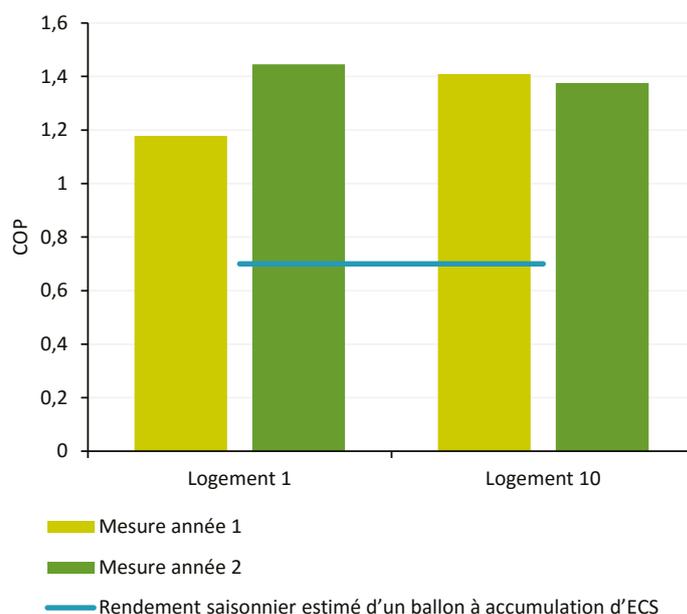
« La plupart des réseaux se trouvent en volume chauffé et ne sont pas calorifugés. On relève en revanche l'isolation des réseaux hors volume chauffé, et du circuit primaire de production d'ECS solaire. »

5.2.5 Les ballons thermodynamiques

Le marché des ballons thermodynamiques était encore émergent à l'époque des appels à projets. Seule une opération utilise cette technologie dans l'échantillon, avec deux ballons instrumentés.

La source froide utilisée pour chauffer les ballons thermodynamiques est constituée de panneaux solaires installés sur des façades.

Illustration 144 – Coefficient de performance des chauffe-eau thermodynamiques instrumentés



Les résultats sont à prendre avec recul, compte tenu du faible échantillon et de l'ancienneté de l'installation. Les prochaines campagnes de mesures permettront d'avoir des résultats plus robustes et plus représentatifs pour ces coefficients de performance.

Dans le cadre du programme RAGE, un suivi de chauffe-eau thermodynamiques a été fait. Les résultats sont décrits dans le rapport *Suivis instrumentés de 20 chauffe-eau thermodynamiques en maison individuelle*, en libre-service sur internet.

Un ballon d'ECS à accumulation a un rendement saisonnier de l'ordre de 0,7 si l'on intègre les pertes de stockage. **La performance des ballons thermodynamiques mesurée dans notre échantillon est 2 fois plus élevée.**

À retenir

Les consommations pour la production d'ECS varient fortement avec les besoins en eau chaude, le mode de production (collectif / individuel, à accumulation instantanée), le type de générateur et les pertes (stockage et bouclage).

Sur l'échantillon, l'habitat comprend quasiment toujours une production solaire. La variabilité des taux de couverture solaire, de 10 à 80 %, est liée aux besoins, mais aussi à des dysfonctionnements divers, y compris de l'appoint. Le recours à la production centralisée entraîne par ailleurs une augmentation de la consommation d'énergie en habitat collectif, du fait des pertes de bouclage et de stockage. Celles-ci pourraient être mieux maîtrisées, notamment par un calorifugeage plus poussé des réseaux.

Dans les bâtiments tertiaires de type bureaux ou enseignement, des ballons électriques sont systématiquement rencontrés, avec une consommation non négligeable.



Au-delà de ces apports techniques centrés sur les systèmes mis en œuvre et les consommations résultantes, les évaluations du Cerema ont également abordé la production d'eau chaude sanitaire de façon plus globale, en intégrant le point de vue de l'utilisateur et sa satisfaction vis-à-vis de son fonctionnement.

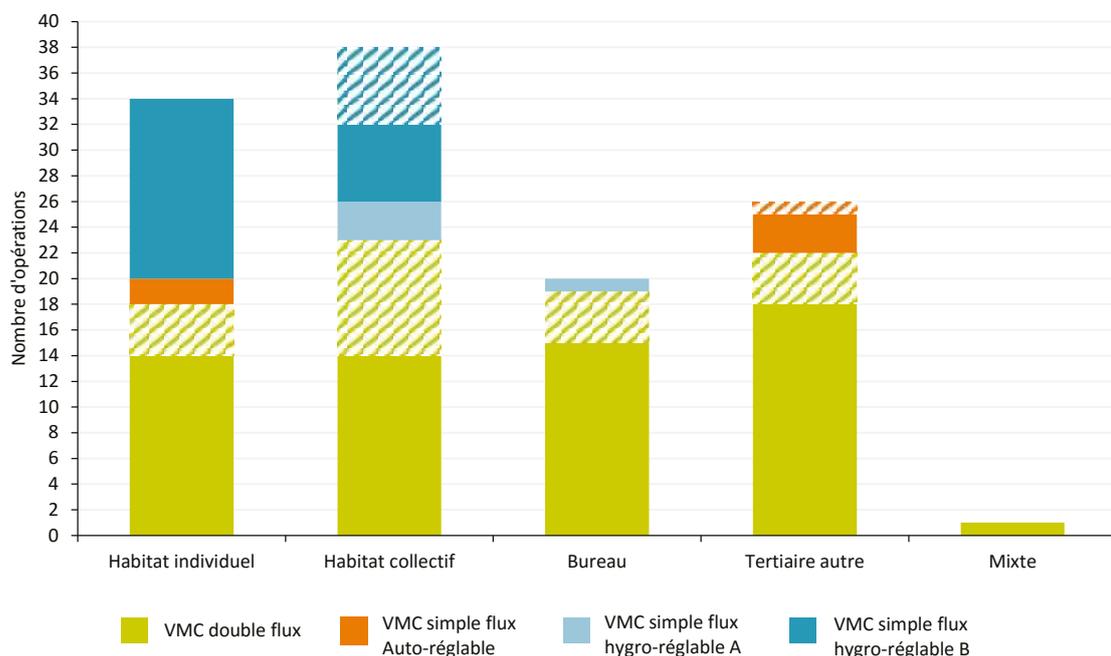
Cette étude d'ordre sociologique témoigne, sur le panel qui lui est propre, d'un **accès plutôt confortable à l'eau chaude sanitaire**, en résidentiel comme en tertiaire (§ 7.7).

5.3 Ventilation

5.3.1 Une prédominance des systèmes double flux dans l'échantillon

Dans l'échantillon de la capitalisation 2016 (constitué majoritairement de lauréats des appels à projets 2008 à 2011), on constate une prédominance des systèmes de ventilation double flux (68 % dans le neuf et 75 % en rénovation) et une installation systématique de ces systèmes dans les bâtiments de bureaux. Le type d'échangeur le plus couramment utilisé est l'échangeur à plaques avec flux croisé (54 %), suivi de l'échangeur à roue (43 %). L'échangeur à plaques avec des flux non croisés n'est utilisé que dans deux opérations.

Illustration 145 – Les systèmes de ventilation installés par fonction de bâtiment



Viennent ensuite les systèmes de ventilation simple flux hygro-réglables de type B (23 % dont 95 % installés dans les logements individuels et collectifs). Des ventilations simple flux autoréglables sont installées dans 5 % des cas et des ventilations simple flux hygro-réglables de type A dans 3 % des cas.

La majorité des bâtiments tertiaires présentent un deuxième système de ventilation pour assurer la ventilation des sanitaires ou d'une zone plus réduite du bâtiment. Dans ces seconds systèmes, on retrouve des systèmes hygro A, hygro B et autoréglables.

De plus, dans deux bâtiments où la ventilation est assurée par simple flux, l'entrée d'air s'effectue par un puits canadien. Ainsi, l'air extérieur est préchauffé.

Un bâtiment tertiaire a également une ventilation double flux couplée avec un puits canadien, mais ce dernier étant inondé, il n'a jamais été utilisé.

Dans une école, le renouvellement de l'air dans les salles de classe est assuré par l'ouverture des fenêtres (ventilation naturelle). Les salles sont équipées de sondes de CO₂ et d'une alarme sonore.

Dans le cas d'un bâtiment de logements collectifs, la ventilation double flux mise en place est de type décentralisé : chaque logement possède son propre caisson de ventilation, les gaines d'arrivée d'air neuf et de rejet d'air vicié sont communes à tous les logements.

5.3.2 Consommations de ventilation

La consommation électrique des ventilateurs en simple flux hygro-réglable (en habitat) est généralement inférieure à 10 kWh_{ep}/m².an, et peut descendre à 3 kWh_{ep}/m².an.

En revanche, elle est généralement plus élevée en double flux. En dehors de l'habitat individuel (moyenne mesurée à 8 kWh_{ep}/m².an), elle est globalement supérieure à 15 kWh_{ep}/m².an en tertiaire, et en moyenne de 13 kWh_{ep}/m².an en habitat collectif.

Illustration 146 – Consommation électrique des ventilateurs en habitat collectif

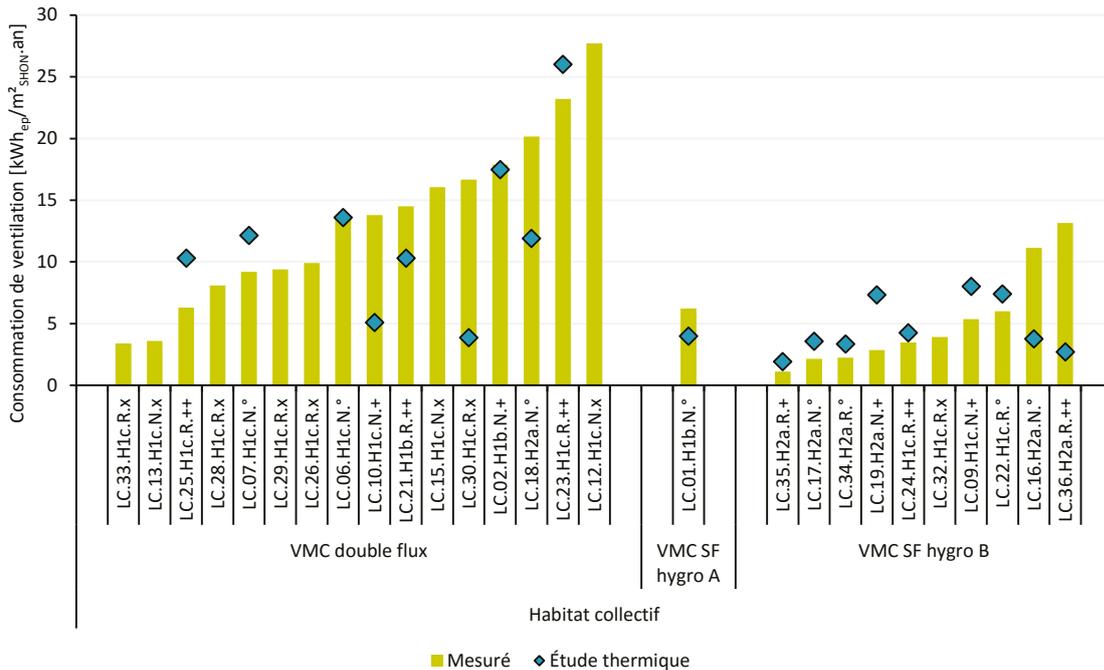


Illustration 147 – Consommation électrique des ventilateurs en habitat individuel

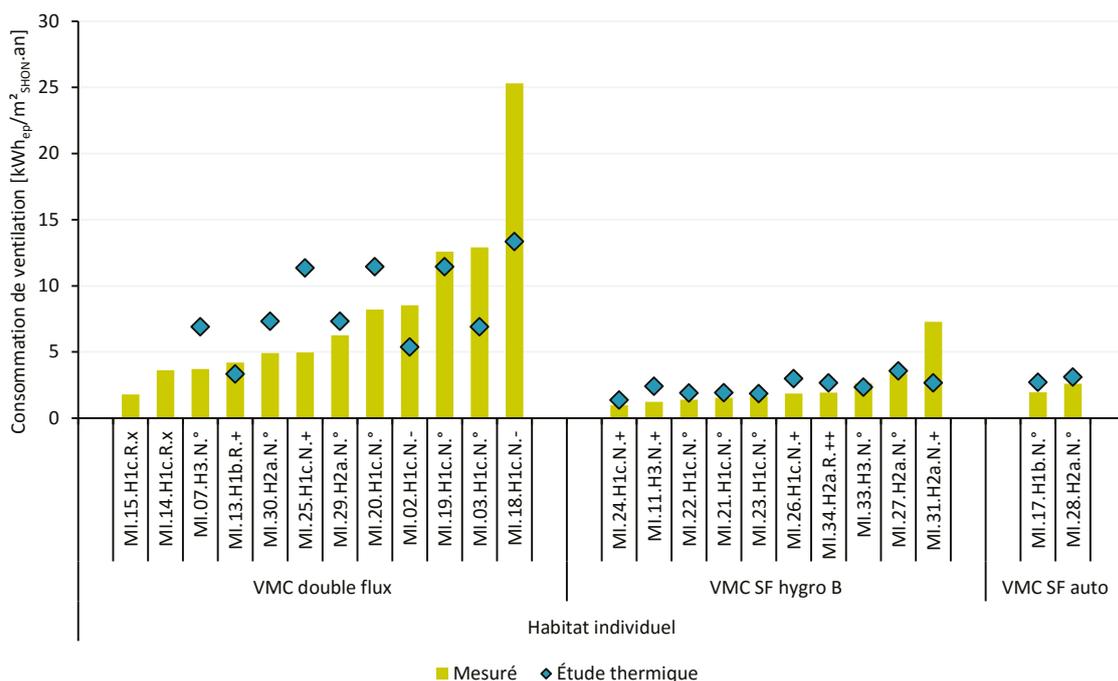


Illustration 148 – Consommation électrique des ventilateurs en bâtiments de bureaux et de culture

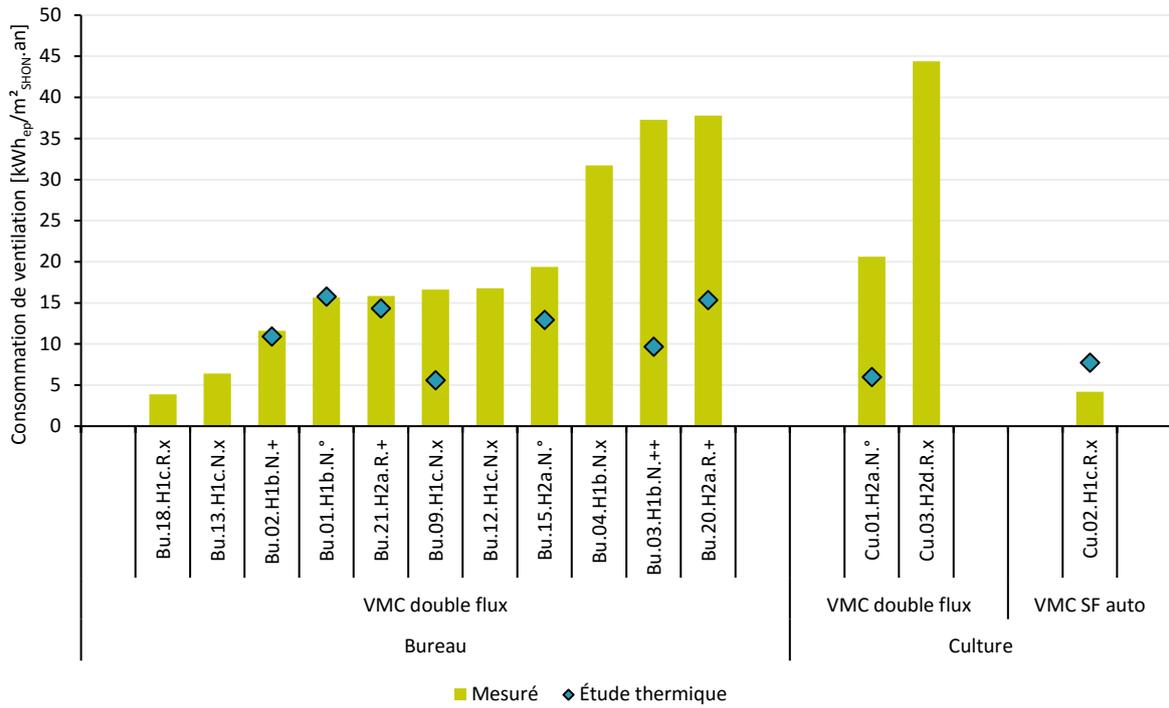
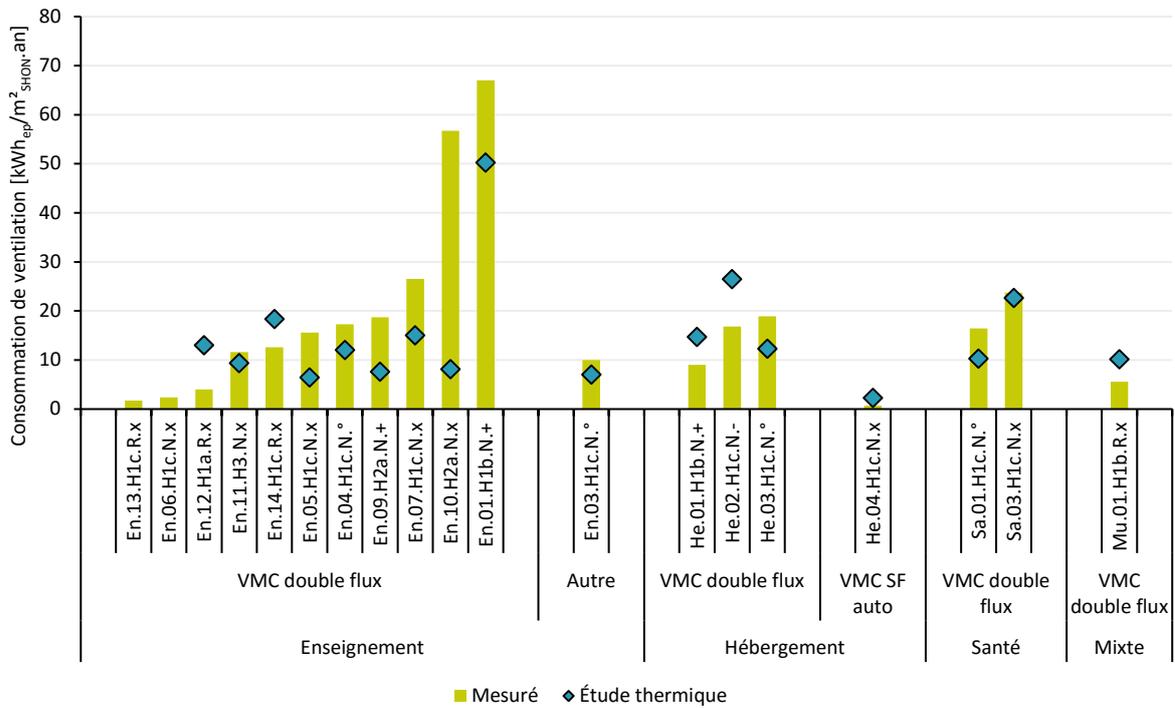


Illustration 149 – Consommation électrique des ventilateurs dans les autres bâtiments tertiaires





Toutefois des consommations sortent du lot :

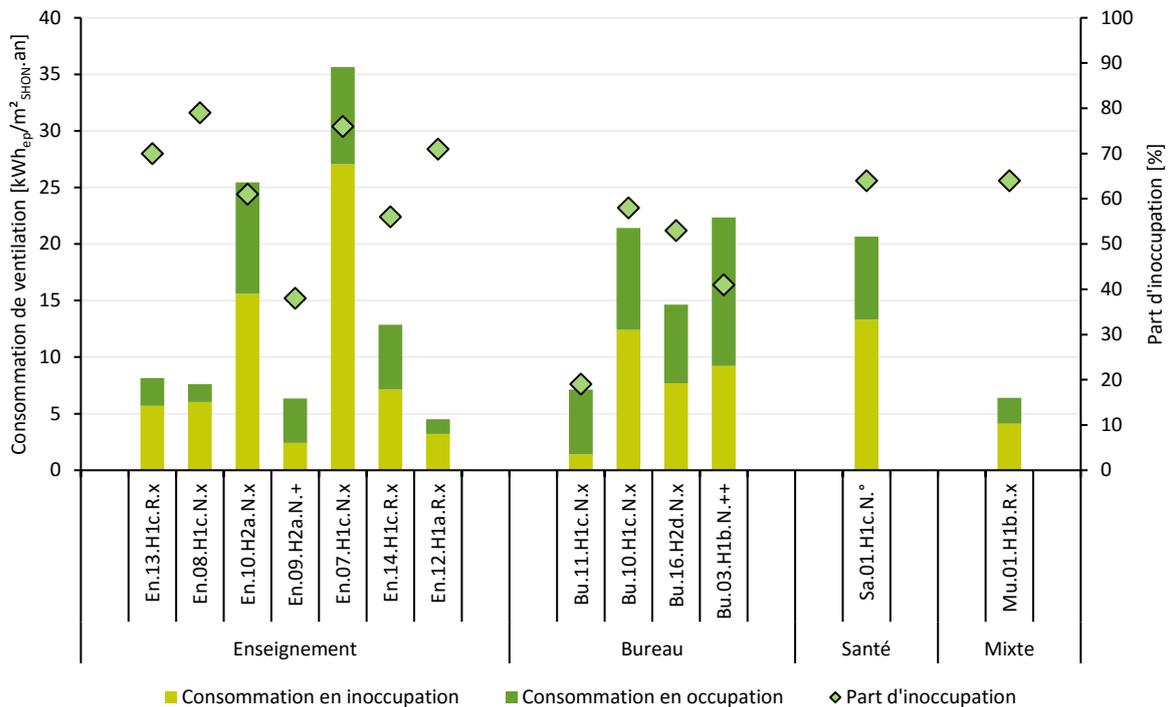
- en habitat collectif, une consommation est très réduite. Cela est dû à un abaissement volontaire des débits de ventilation car une fois la centrale de traitement d'air (CTA) réglée sur les débits hygiéniques, les bouches d'extraction des logements les plus proches du caisson sont très bruyantes alors que dans les autres logements le débit n'est toujours pas suffisant ;
- en tertiaire, une école a une consommation très faible suite à l'arrêt de la CTA pendant plus de 72 % du temps en heures ouvrées. Inversement, dans une autre école, les débits sont réglés au-dessus des débits hygiéniques dans le but d'améliorer la qualité de l'air mais aussi parce que le chauffage est assuré par insufflation d'air chaud. Enfin, dans une crèche on constate que les trois VMC ne sont pas arrêtées en inoccupation (§ 5.3.3), ce qui augmente fortement la consommation des ventilateurs par rapport au scénario réglementaire.

5.3.3 En tertiaire, des consommations élevées en inoccupation

Les mesures réalisées ont permis de distinguer la consommation totale de ventilation en occupation et en inoccupation sur 13 bâtiments tertiaires : 2 crèches, 5 écoles, 4 bureaux et 2 maisons de santé.

Excepté dans un cas, toutes ces opérations sont munies d'une ou plusieurs CTA double flux.

Illustration 150 – Consommation en occupation et en inoccupation de la ventilation dans des bâtiments tertiaires



Dans 7 cas sur 13, la consommation de ventilation en inoccupation représente plus de 60 % des consommations annuelles. Et dans 5 cas ces consommations sont responsables de plus de 10 kWh_{ep}/m².an.

La consommation en inoccupation représente moins de 50 % des consommations totales uniquement dans 3 cas.

Pour un immeuble de bureaux et une crèche en Rhône-Alpes :

« Dans les bâtiments à usage intermittent, la ventilation gagnerait à être arrêtée en dehors des heures d'occupation (économie allant jusqu'à 50 % de la consommation de ventilation d'une VMC simple flux). »

Les dérives suivantes, expliquant une partie des constats précédents, ont pu être observées :

- fonctionnement permanent des CTA double flux ;
- dérives dans le temps, malgré une horloge bien réglée au départ ;
- CTA coupée la nuit, mais fonctionnant les week-ends ;
- CTA fonctionnant pendant les vacances dans des écoles (non occupées par un centre aéré).

5.3.4 Des échangeurs double flux qui tiennent leurs promesses

Le poste des déperditions par ventilation est particulièrement important dans les bâtiments à basse consommation, en particulier lorsque la densité d'occupation impose des débits de renouvellement d'air importants.

Avec une VMC double flux à récupération de chaleur, la réduction de consommation de chauffage liée au renouvellement d'air est conséquente.

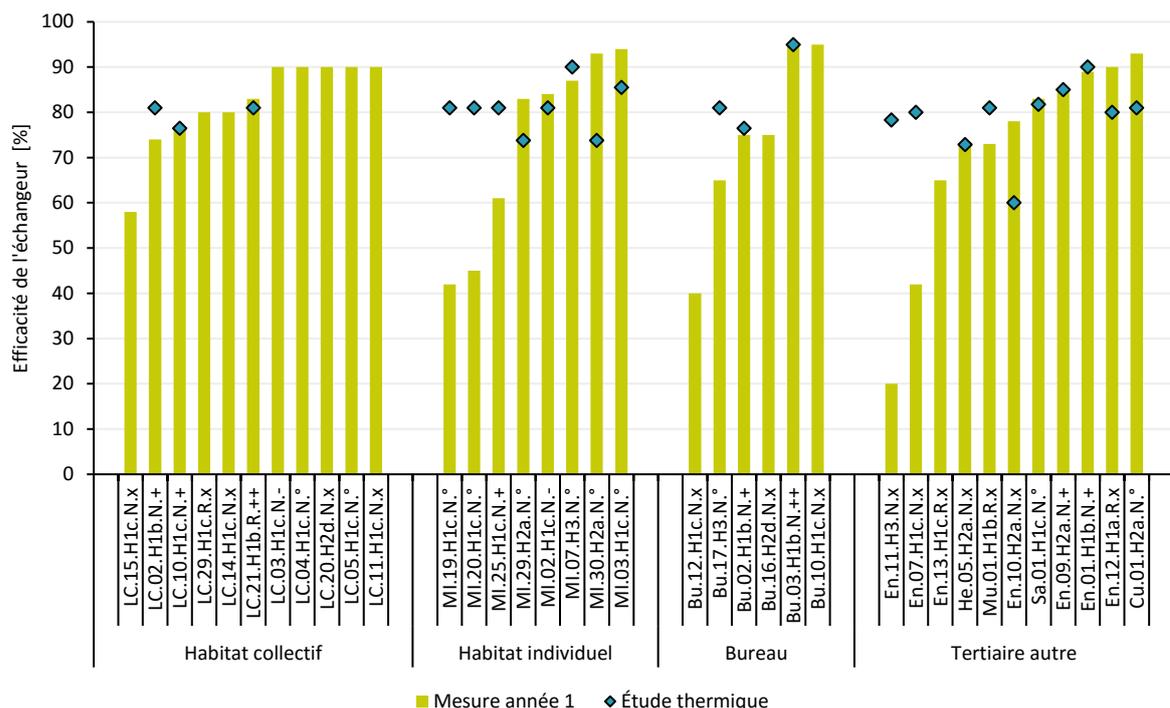
Pour un immeuble de logements en Rhône-Alpes :

« Une économie sur la consommation de chauffage de 10 à 12 kWh_{ep}/m².an a été obtenue, avec une efficacité de 70 à 80 % . »

Des efficacités très souvent supérieures à 70 %

L'efficacité mesurée des échangeurs de chaleur (§ A.4.2) est le plus souvent supérieure à 70 %. Dans 2 cas sur 3 où l'efficacité est inférieure à 60 %, des dysfonctionnements ont pu être observés (voir ci-après).

Illustration 151 - Efficacité des échangeurs double flux



Points de vigilance sur les installations double flux

En dehors des cas où il a été noté que les installations fonctionnaient en continu, des problèmes de mise en œuvre ou de régulation ont pu être observés. Ces dysfonctionnements sont en partie à l'origine des rendements les plus faibles observés ci-avant.

Une défaillance de la régulation des débits est observée dans 8 cas. Il peut s'agir aussi bien :

- d'un débit de soufflage supérieur au débit extrait, ce qui entraîne une quantité d'air froid entrant dans l'échangeur supérieur ;
- ou d'un débit d'extraction supérieur au débit de soufflage ; dans ce cas, le rendement n'est pas forcément impacté, mais des entrées d'air parasites sont observées.



Ces différences de débit sont souvent liées à des absences ou des dysfonctionnements des capteurs de différence de pression assurant la régulation.

Pour un bâtiment d'enseignement en Rhône-Alpes :

« Avec le déséquilibre des débits, l'efficacité mesurée de l'échangeur de la CTA élémentaire (le seul qui a fonctionné...) est de seulement 42 % (efficacité calculée grâce aux températures et débits). »

Dans trois cas, il a été observé une absence d'alarme indiquant des défaillances des ventilateurs. Ainsi, pendant de longues périodes, des systèmes de ventilation n'ont pas fonctionné sans que les occupants s'en rendent compte.



Cela a un impact non seulement sur la récupération de chaleur, mais aussi sur la qualité de l'air, car le bâtiment n'est pas ventilé.

Pour un bâtiment d'enseignement en Languedoc-Roussillon :

« La CTA a été coupée pendant plus d'un mois en hiver, personne ne s'en est rendu compte. »

Enfin, des problèmes liés à l'installation des ventilateurs et/ou des réseaux ou à des dysfonctionnements des ventilateurs sont à l'origine de rendements réduits et de problèmes de renouvellement d'air. Ces dysfonctionnements ont été relevés dans quatre opérations.

Dans une opération, les ventilateurs ne tournaient pas dans le bon sens (mauvaise installation du caisson). Les réseaux ne pouvaient donc pas monter en pression.

Pour un bâtiment d'habitat collectif en Rhône Alpes :

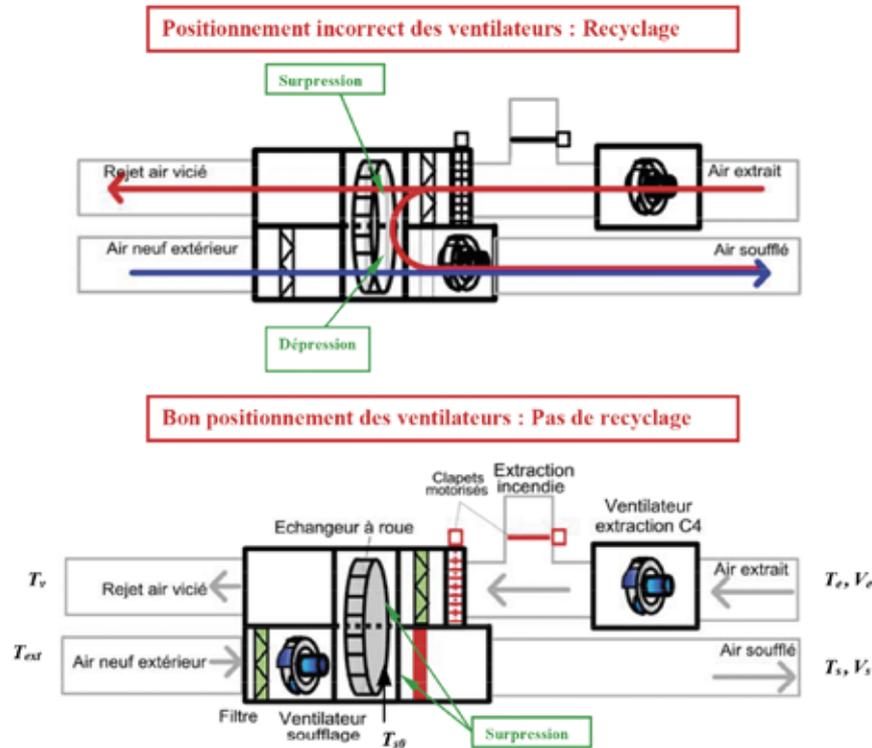
« Mauvais sens de rotation des ventilateurs entraînant une incapacité de monter en pression. »

Dans la deuxième opération de logements collectifs, plusieurs dysfonctionnements ont été observés :

- un des ventilateurs a fonctionné pendant plusieurs mois avec le volet fermé au niveau de l'extraction (dysfonctionnement du ventilateur) ;
- dans un autre caisson, le ventilateur de soufflage était mal positionné, ce qui a entraîné un recyclage de l'air. La qualité de l'air est en jeu dans ce type de situation (mauvaise installation du caisson).



Illustration 152 - Placement des ventilateurs (source Enertech)



Dans une autre opération de logements collectifs, les modules de régulation avaient été montés à l'envers ce qui avait un impact important sur les débits.

Enfin, pour une opération de logement individuelle, c'est la mise en œuvre des caissons et des réseaux qui n'a pas été soignée, en particulier en termes d'étanchéité des réseaux et des jonctions. Les pertes sont importantes et les rendements en sont d'autant plus réduits.

Pour un bâtiment d'habitat individuel en Auvergne :

« Lors du suivi de chantier, des problèmes de mise en œuvre de la ventilation double flux ont été constatés. En plus de détériorer la perméabilité à l'air des bâtiments, cette mauvaise mise en œuvre fait chuter le rendement de l'échangeur. Le rendement mesuré est de 61 % pour une valeur théorique annoncée de 81 %. »

Intérêt énergétique des échangeurs double flux

Les gains thermiques liés aux échangeurs double flux pour les opérations étudiées dans l'illustration 110 vont de 6 à 15 kWh/m².an pour le chauffage et de 0 à 3,5 kWh/m².an pour le froid.

Une relation peut être établie avec les consommations de la motorisation de la VMC double flux, qui vont de 5 à 21 kWh_{ep}/m², sans qu'il soit possible de conclure sur l'intérêt énergétique. En effet, il convient de considérer l'ensemble « ventilation + chauffage » pour évaluer l'efficacité globale d'un système de ventilation double flux :

- les gains énergétiques dépendent de l'efficacité du système de chauffage ;
- les gains thermiques de récupération ne sont utiles qu'au moment où ils viennent réduire les besoins de chauffage ;
- les pertes par perméabilité à l'air de l'enveloppe augmentent (du fait de l'équilibre des pressions induit par le double flux) ;
- l'efficacité de la ventilation doit prendre en compte les débits hygiéniques dans tous les locaux.

5.3.5 Des pratiques à optimiser



Des défauts d'étanchéité sur les réseaux

Au-delà de l'efficacité des échangeurs de chaleur, des problèmes d'étanchéité des réseaux sont rencontrés sur plusieurs opérations.

Un entretien souvent insuffisant

Le maintien dans le temps des performances de ventilation représente un enjeu important pour la consommation de chauffage.

Dans l'ensemble, l'entretien des VMC est encore peu pris en compte dans la gestion des bâtiments, que ce soit en habitat ou en tertiaire. En effet, les occupants sont peu sensibles à l'entretien qui doit être fait, et assez souvent des filtres déjà très encrassés ont été observés (dans les deux années de suivi seulement), réduisant les débits, voire entraînant des ruptures des filtres et de leur support.

Pour un immeuble de logements en Rhône-Alpes :

« L'encrassement du filtre de soufflage, qui conduit à une diminution du débit d'air soufflé, donc à une augmentation des infiltrations à travers l'enveloppe du bâtiment (phénomène de compensation), peut entraîner une surcharge de chauffage de l'ordre de 8 kWh_{ep}/an/m². »

Des réglages de bypass restant à optimiser

Sur les cas où la présence du bypass est avérée, la régulation se fait en fonction de la température extérieure. Les seuils de température sont très disparates : 12 °C, 15 °C, 21 °C. Le choix de cette température de consigne est pourtant essentiel pour le rafraîchissement gratuit la nuit. Si on veut une optimisation totale du système, il faudrait des températures de consigne différentes entre la mi-saison et l'été.

Des surventilations d'été sous-utilisées et insuffisantes

La surventilation, même si sa gestion est prévue dans de nombreuses CTA est très peu utilisée.

Dans la partie commerce d'un bâtiment mixte en Lorraine :

« La surventilation nocturne n'est pas utilisée. Les locaux ne sont donc pas rafraîchis la nuit et les inconforts de température en été ne sont pas réduits. »

Pour les bâtiments très isolés thermiquement, et à forte inertie, la ventilation mécanique nocturne sans augmentation du débit réglementaire n'est généralement pas suffisante pour réduire la température des locaux. Dans les cas où la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres est envisageable, cette solution serait plus performante pour refroidir, du fait des débits importants qu'elle engendre (performance de source externe, non mesurée ici), et ne consommerait pas d'énergie.

À retenir

Dans les bâtiments fortement isolés thermiquement et sans fuites d'air parasites, le poste de déperdition par ventilation prend une place plus importante dans le bilan thermique. La consommation de chauffage y est d'autant plus sensible.

La consommation des ventilations hygroréglables en habitat individuel peut être très faible, inférieure à 3 kWh_{ep}/m².an. Mais le double flux peut avoisiner 15 kWh_{ep}/m².an en habitat collectif, ou le dépasser en tertiaire, ce qui vient réduire l'intérêt des gains thermiques obtenus par les échangeurs.

En revanche, beaucoup de bâtiments tertiaires non occupés la nuit ou les week-ends sont ventilés en période d'inoccupation. La consommation en inoccupation peut représenter jusqu'à 60 % de la consommation totale de ventilation.

L'efficacité des échangeurs de récupération d'énergie sur air extrait des VMC double flux s'avère très bonne. Les dysfonctionnements observés sont liés à des problèmes de mise en œuvre ou de régulation. Les systèmes de ventilation double flux plus complexes à mettre en œuvre que les systèmes de simple flux demanderaient à être installés par des professionnels de l'aéraulique et non par les électriciens, comme cela est régulièrement le cas.

Malgré deux ans de fonctionnement uniquement, assez souvent des filtres très encrassés ont été observés, réduisant les débits, voire entraînant des ruptures des filtres et de leur support.

Pour le confort d'été, la ventilation nocturne est davantage indispensable pour éviter le confinement des apports internes et solaires. S'il est possible, le recours à l'ouverture des fenêtres, non consommateur d'énergie, peut être envisagé plutôt qu'une surventilation.



Au-delà de ces apports techniques centrés sur les systèmes mis en œuvre et les consommations résultantes, les évaluations du Cerema ont également abordé la ventilation de façon plus globale, en intégrant le point de vue de l'utilisateur et sa satisfaction vis-à-vis de son fonctionnement.

Cette étude d'ordre sociologique souligne, sur le panel qui lui est propre, des **difficultés d'appropriation du système relativement récurrentes en résidentiel** (§ 6.3).

5.4 Auxiliaires

Les mesures montrent que les auxiliaires de chauffage, d’ECS et de climatisation consomment autour de **7 kWh_{ep}/m².an**. Cette consommation varie de 2 à 25 kWh_{ep}/m².an, quelle que soit la fonction du bâtiment.

Illustration 153 – Consommation mesurée des auxiliaires dans l’habitat

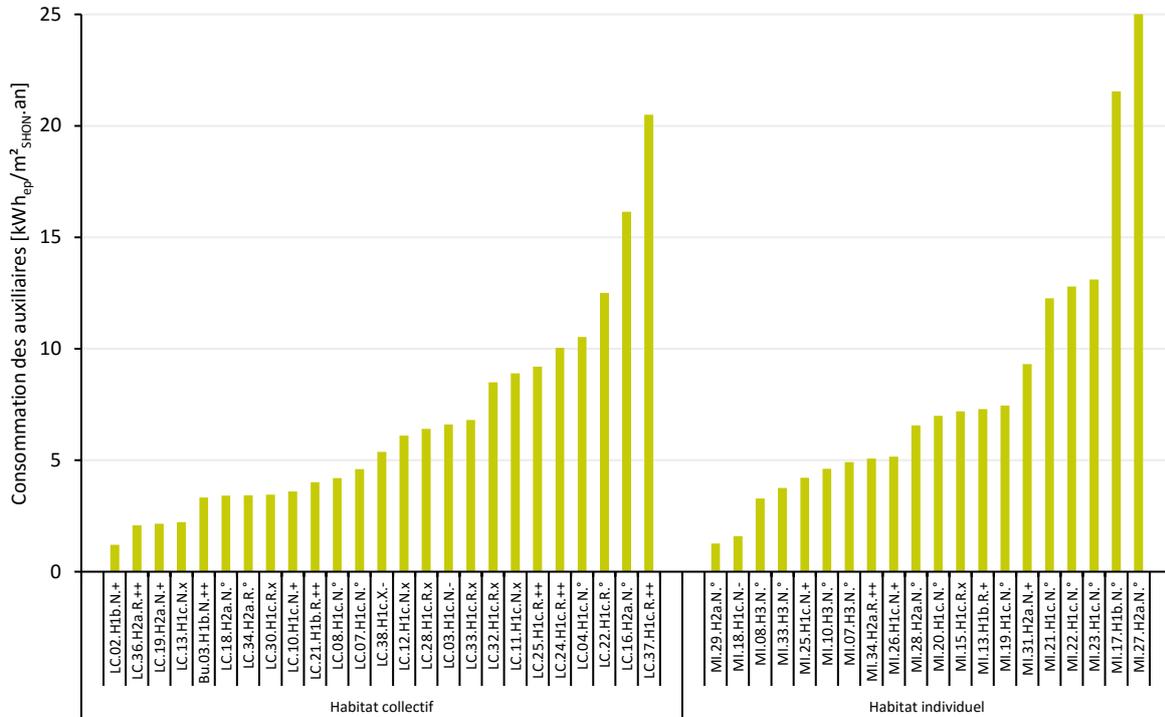
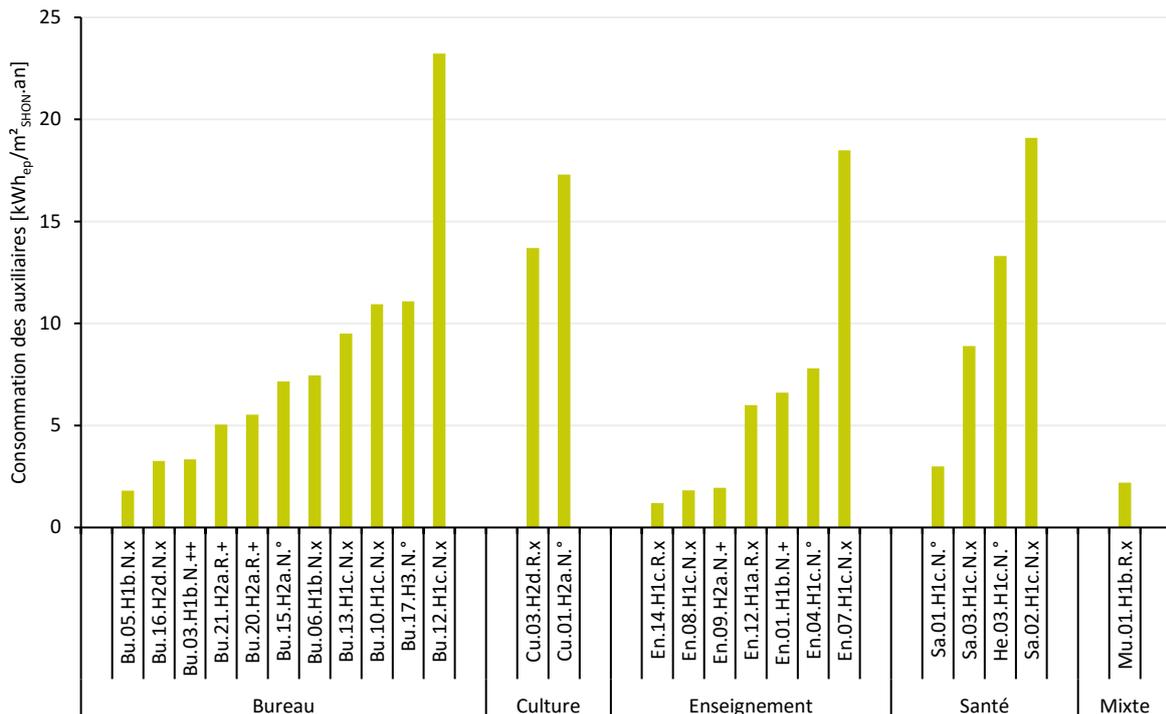


Illustration 154 – Consommation mesurée des auxiliaires dans les bâtiments tertiaires



En comparant ces valeurs mesurées à celles de l'étude thermique réglementaire, on constate les tendances suivantes :

- pour l'habitat individuel (échantillon de 20 opérations), les **consommations mesurées sont proches des valeurs de l'étude thermique**, sauf en cas de dérive ;
- pour l'habitat collectif (25 opérations) et les bâtiments tertiaires (18 opérations), les **mesures sont supérieures aux résultats des calculs**.



Lorsqu'il y a une dérive sur la consommation des auxiliaires, les erreurs suivantes ont été repérées :

- durée de fonctionnement des pompes :
 - **pompes ayant un fonctionnement permanent** (erreur détectée sur un groupe froid),
 - **pompes ayant uniquement un calendrier annuel pour leur fonctionnement** (fonctionnement permanent du 1^{er} octobre au 30 avril par exemple). Il arrive alors que les pompes fonctionnent alors qu'il n'y a pas de besoins ;
- puissance des pompes installées trop élevées :
 - pour la puissance des pompes, les surconsommations sont dues à des écarts entre la puissance prescrite dans le CCTP et la puissance installée. Il arrive également qu'aucune puissance ne soit prescrite dans le CCTP,
 - l'écart entre la puissance prescrite dans le CCTP et la puissance installée est d'un facteur 5 dans un cas ;
- pompes non paramétrées :
 - des **pompes à débit variable ne sont pas paramétrées, et fonctionnent à débit fixe** (à leur débit maximal) à chaque fois qu'elles sont en marche ;
- un écart de température faible entre le départ et le retour :
 - sur plusieurs bâtiments le **ΔT est faible sur les circuits secondaires**, même en hiver, **résultant d'un débit imposé par les pompes important**. Dans ces cas le débit peut être abaissé pour diminuer les consommations d'auxiliaires.

Les dérives en maisons individuelles

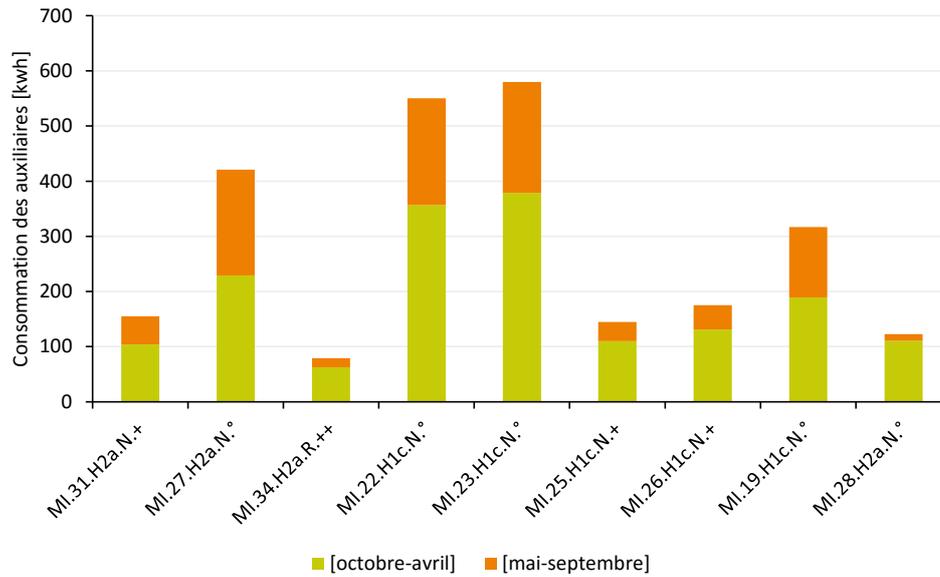
C'est en maison individuelle que l'on observe les plus grands écarts sur les consommations des auxiliaires, avec des consommations allant de 1,2 kWh_{ep}/m².an à 25 kWh_{ep}/m².an, et une majorité de valeurs entre 4 et 7 kWh_{ep}/m².an.



Les surconsommations détectées s'expliquent par des pompes réglées sur leur puissance maximale, allant de 50 à 70 W et fonctionnant toute l'année.

Pour 9 maisons, les consommations mensuelles sur une année de mesure ont pu être isolées.

Illustration 155 – Consommation mensuelle des auxiliaires pour 9 maisons individuelles en/hors saison de chauffe



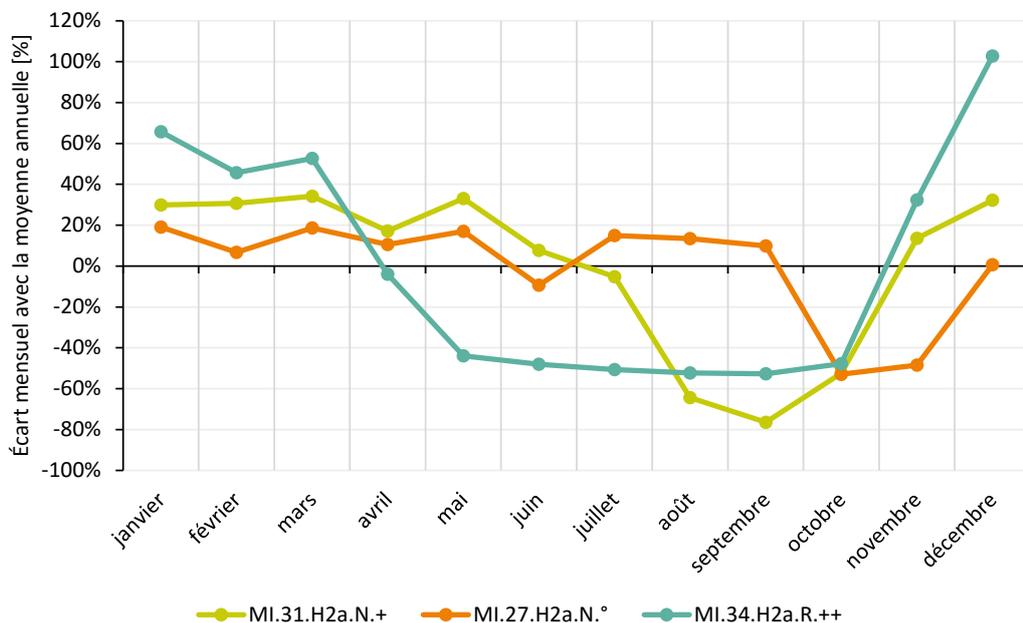
Sur l'illustration 155, on voit que les consommations d'auxiliaires hors saison de chauffe sont importantes. En effet, dans 4 cas sur 9, la pompe de chauffage fonctionne en permanence. Pourtant ces différentes opérations étant des bâtiments démonstrateurs, on pourrait s'attendre à un meilleur suivi et donc des dérives plus masquées.

Pour des maisons individuelles en Bretagne :

« Parmi les maisons du lotissement construites, trois ont été suivies. Elles ont toutes les trois le même système de chauffage, d'ECS, et la même pompe de distribution installée. Et la même puissance maximale est atteinte sur l'année.

Pourtant il y a un facteur 5 sur les consommations d'auxiliaires entre la meilleure maison et la moins bonne! »

Illustration 156 – Écart mensuel avec la moyenne annuelle des consommations d'auxiliaires de ces trois maisons en Bretagne



Pour le logement MI.34, la durée de fonctionnement de la pompe est optimisée, avec une forte consommation en hiver, une faible consommation en été : **Caux = 5,07 kWh_{ep}/m².an.**

Dans le MI.31, soit la pompe est programmée pour s'arrêter hors saison de chauffe, soit l'occupant la coupe manuellement. En revanche, en saison de chauffe sa consommation semble permanente, avec peu d'écart entre la mi-saison et le plein hiver : **Caux = 9,31 kWh_{ep}/m².an.**

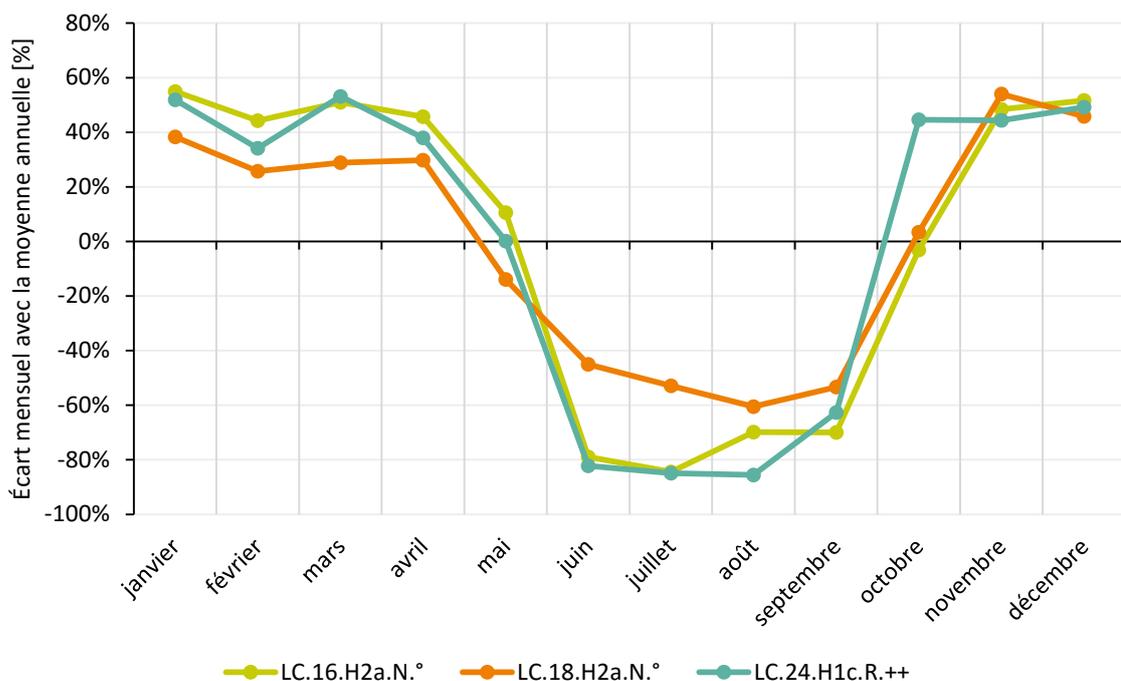
Dans le MI.27, aucun paramétrage n'est fait. On a même une consommation légèrement plus élevée en été qu'en hiver ! **Caux = 25,02 kWh_{ep}/m².an.**

Moins de dérives en logements collectifs ?

Des données détaillées sont disponibles pour 3 bâtiments collectifs pour les pompes de distribution, et 3 bâtiments collectifs pour les pompes solaires.

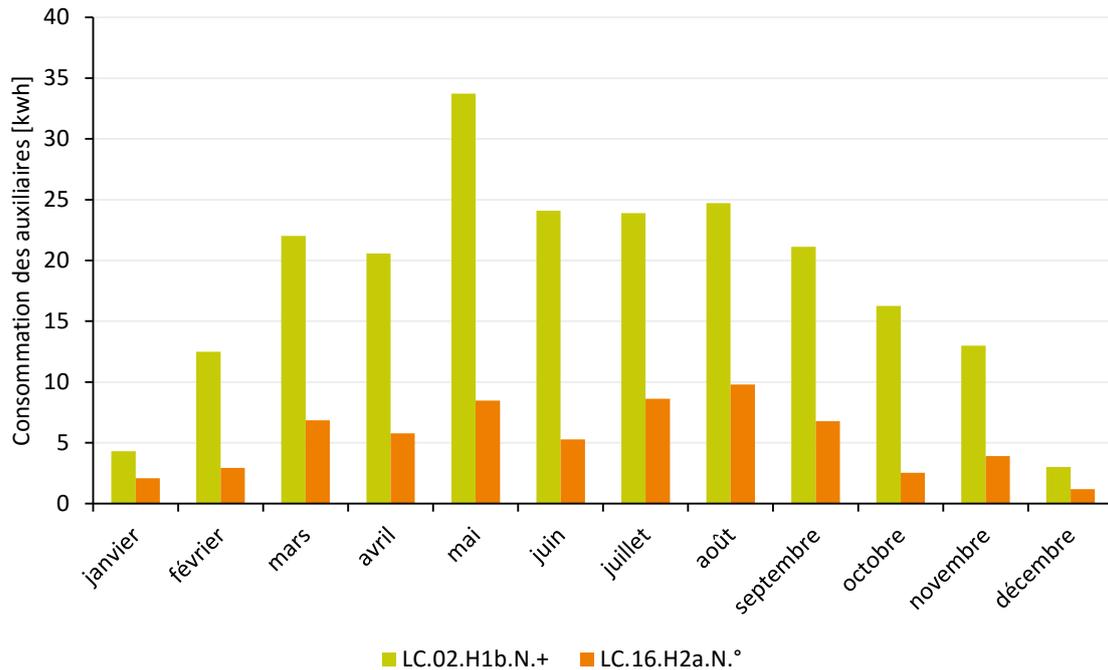
Pour les pompes de chauffage, dans les trois cas leur fonctionnement est optimisé. Ci-dessous sont reportés les écarts de consommation mensuelle avec la consommation moyenne annuelle.

Illustration 157 – Écart mensuel avec la moyenne annuelle



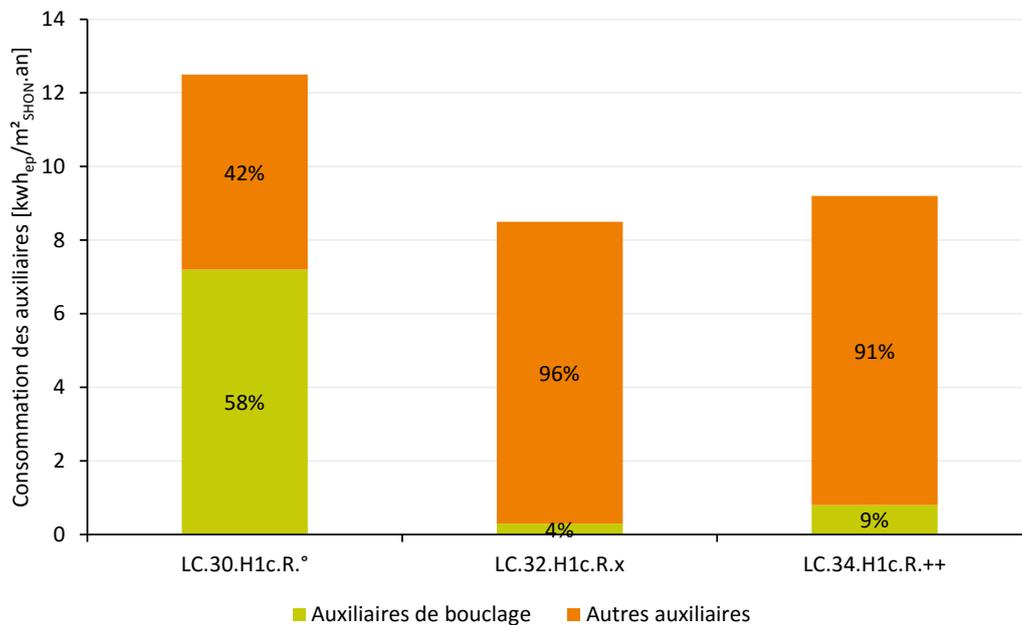
Les auxiliaires solaires sont également bien paramétrés. Le profil est cohérent avec la répartition des apports solaires sur l'année.

Illustration 158 – Consommation mensuelle de la pompe solaire



Les dérives n’apparaissent pas sur toutes les pompes, mais peuvent en concerner certaines. Sur trois logements collectifs, la consommation spécifique de la pompe de bouclage a été mesurée.

Illustration 159 – Part du bouclage dans les consommations d’auxiliaires en collectif



Pour l’habitat LC.30H1c.R.°, une dérive importante est mesurée sur la pompe de bouclage, avec une consommation de plus de 7 kWh_{ep}/m².an, représentant presque 60 % de la consommation totale d’auxiliaires. Il s’est avéré que la pompe installée avait une puissance de 800 W ! Le suivi a permis d’identifier la dérive. La pompe a été remplacée, lors de la deuxième année de mesure, par une pompe 20 fois moins puissante (8-40 W), permettant une baisse de 93 % de la consommation électrique du bouclage.

Dans le tertiaire, une intermittence qui ne se limite pas à la saison de chauffe

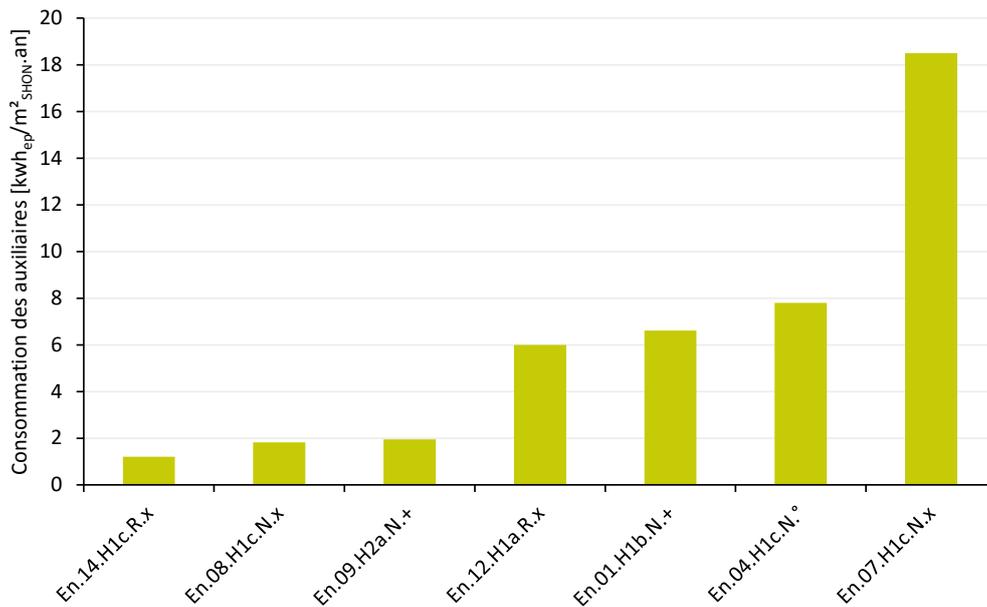


Dans les bâtiments tertiaires, l'intermittence du fonctionnement des pompes se limite parfois à l'alternance « saison de chauffe » et « hors saison de chauffe », alors que l'occupation est différente entre jour et nuit, et entre semaine et week-end.

Par exemple, sur les 7 écoles ou crèches de l'échantillon, des consommations très variables sont obtenues pour les auxiliaires de chauffage.

Pourtant les pompes de distribution sont coupées dans tous les cas hors saison de chauffe.

Illustration 160 – Consommation des auxiliaires dans les écoles et crèches



Dans les trois premiers cas, les pompes sont asservies à la chaudière, qui est elle-même probablement asservie à l'occupation et à la température extérieure.

Dans le dernier cas, la pompe fonctionne en continu à puissance maximale sur l'ensemble de la saison de chauffe.

On arrive à un facteur 15 entre les pompes les mieux optimisées, et les pompes les moins optimisées.

Point de vigilance : les chaufferies sont différentes d'un bâtiment à l'autre. D'autres facteurs (nombre de pompes, longueur des réseaux, pompes à débit fixe ou variable...) influenceront également sur cette consommation.

À retenir

Les auxiliaires de chauffage et d'ECS dans notre échantillon consomment autour de 7 kWh_{ep}/m².an.

Les trois causes de dérive des consommations pour les pompes sont :

- une durée de fonctionnement trop longue ;
- une puissance installée trop élevée ;
- des pompes à débit variable non paramétrées.

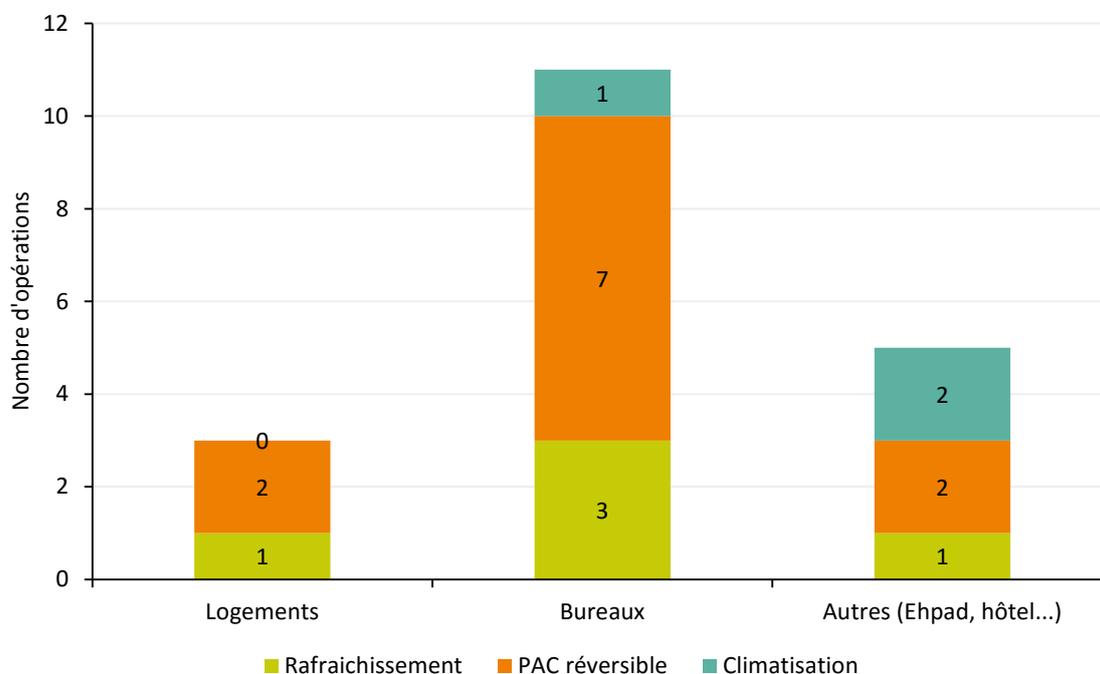
5.5 Refroidissement

Dans l'échantillon, seuls les bureaux sont généralement refroidis (70 % d'entre eux). Les autres fonctions (habitat et tertiaire autre) ne sont que très rarement climatisées.

Aucun bâtiment de bureaux n'est climatisé en Bretagne (zone H2a). En revanche, ils le sont systématiquement dans le Sud méditerranéen, mais aussi dans l'Est (zones H3 et H1b; Illustration 120 pour la carte des zones climatiques). Il est surprenant de trouver autant de bâtiments refroidis en Lorraine, en zone H1b et catégorie CE1 (sauf zones de bruit ou fenêtres non ouvrables), mais le climat est continental. Dans les autres zones climatiques, le refroidissement mis en place est cohérent avec la définition des catégories CE1 et CE2 de la réglementation thermique 2005³².

Pour 19 opérations refroidies, les équipements de refroidissement rencontrés sont décrits dans l'illustration 161.

Illustration 161 – Répartition du refroidissement suivant la fonction du bâtiment



Pour les **bureaux**, les mesures font apparaître une consommation autour de **7 kWh_{ep}/m².an**, de 1 à 14 kWh_{ep}/m².an.

32. La RT 2005 distingue deux catégories de locaux relativement au confort d'été et au refroidissement. Pour les locaux dits de catégorie CE1, les consommations de référence liées au refroidissement sont nulles. Ces locaux doivent respecter l'exigence sur la température intérieure de confort. Pour les locaux dits de catégorie CE2, nécessitant d'être climatisés sous conditions (exposition au bruit...), les consommations de référence liées au refroidissement sont calculées. Ces locaux ne sont pas soumis aux exigences de confort d'été.

Elles ont également permis de mesurer le coefficient d'efficacité frigorifique EER (Energy Efficiency Ratio) sur trois bâtiments, pour 3 pompes à chaleur Eau/Eau sur nappe: un EER de 2,43 pour une crèche, des EER de 4,5 et de 5,1 pour deux bureaux.



Différentes dérives de consommation ont été constatées :

- un pilotage par l'occupant non maîtrisé ;

Pour un bâtiment de bureaux en Rhône-Alpes :

« Le refroidissement des locaux est régulé soit par des thermostats d'ambiance (souvent couplés à l'occupation), soit par l'usager (pour le groupe froid ajouté après). Il a alors été réglé sur 21 °C, et n'a pas été arrêté en fin d'utilisation. Il a tourné tout l'été. »

- un groupe froid non asservi à l'émission ;

Pour un bâtiment de bureaux :

« Dans un cas où la climatisation est liée à la CTA (émission par batterie froide), plus de la moitié de la consommation a lieu alors que la CTA est coupée. La climatisation fonctionne en permanence alors que la CTA ne fonctionne qu'en occupation. »

- un refroidissement toujours actif en hiver.

Pour un bâtiment de bureaux :

« Dans un cas où le rafraîchissement sur nappe est lié à la CTA (émission par batterie froide, opération différente du cas précédent), la pompe sur nappe a fonctionné tout l'hiver, et la vanne de la batterie froide est restée ouverte tout l'hiver. Le bâtiment a donc été rafraîchi en même temps qu'il était chauffé. »

À retenir

Les systèmes rafraîchissement des bureaux dans notre échantillon consomment autour de 7 kWh_{ep}/m².an. Ce chiffre est à prendre avec recul, dans la mesure où l'échantillon est faible. Il ne concerne aussi que des bâtiments Prebat, où le confort d'été a été soigné dès la conception. Ce chiffre sera probablement plus élevé dans un bâtiment moins performant.

Trois causes de dérives des consommations ont principalement été identifiées :

- un pilotage par l'occupant non maîtrisé ;
- un groupe froid non asservi au fonctionnement de l'émission ;
- une climatisation encore active en hiver.

5.6 Éclairage

Ce chapitre traite de l'installation d'éclairages naturels et artificiels comprenant l'éclairage général :

- de la fonction principale du bâtiment (espace privatif en logement, salle de classe pour les écoles...);
- des communs et circulations (hors ascenseurs);
- des parkings intérieurs (consommation hors champ réglementé);
- et des espaces extérieurs (également hors champ réglementé).

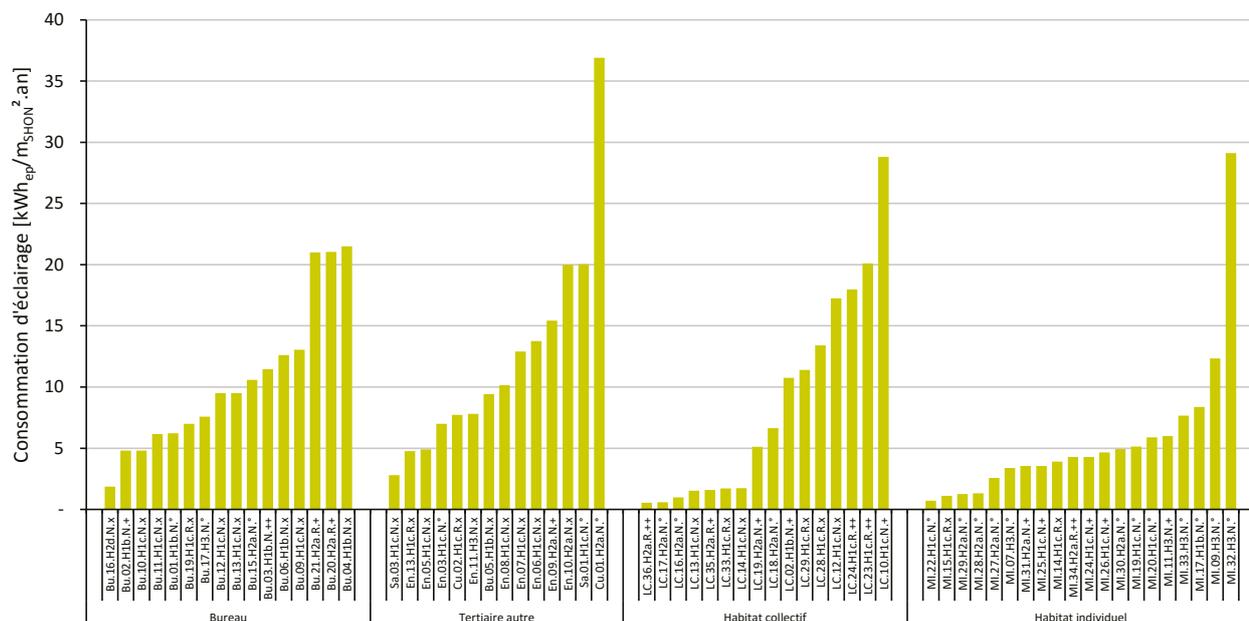
L'éclairage d'appoint ne peut encore être valablement analysé compte tenu des informations disponibles sur l'échantillon.

L'éclairage des ascenseurs et l'éclairage de sécurité sont traités aux § 5.7.2 et 5.7.3.

5.6.1 Des consommations dans le champ réglementé très variables

L'illustration 162 montre les consommations mesurées par fonction des bâtiments. N'y figurent pas les opérations d'habitat collectif qui ne disposent que de la consommation des parties communes, et non de la consommation à l'intérieur des logements (parties non instrumentées).

Illustration 162 – Consommation d'éclairage mesurée



Quelle que soit la fonction du bâtiment, les consommations sont très variables. La consommation réelle ne dépend pas de la performance du bâtiment livré mais du choix et de l'usage des luminaires par les occupants.

Globalement les consommations d'éclairage sont plus élevées en tertiaire (autour de 10 kWh_{ep}/m².an) qu'en maison individuelle (autour de 5 kWh_{ep}/m².an).

Pour chaque fonction de bâtiment, des dérives de consommation sont constatées. La consommation d'éclairage dépasse alors 20 kWh_{ep}/m².an.

Nota : les consommations sont celles de l'éclairage général mesurées en tableau électrique. Elles ne comprennent pas les consommations de l'éclairage mobilier (par exemple lampadaire sur circuit prise), ce qui contribue à la dispersion des résultats.

5.6.2 Quelques conceptions recherchées en éclairage naturel

Dans certains bâtiments, il apparaît qu'une réflexion sur la conception architecturale ait eu lieu, favorisant l'éclairage naturel.

En habitat collectif, les cages d'escalier ne sont plus des espaces aveugles. Elles sont soit munies de fenêtres, soit supplantées par des escaliers et des coursives extérieurs.

En tertiaire, la prise de jour jusqu'au cœur du bâtiment est rendue possible par de larges baies vitrées, le décroisement des locaux et la mise en place d'impostes vitrées entre les locaux et les circulations. De même, l'installation de puits de lumière et de sheds en toiture laisse pénétrer la lumière au cœur des bâtiments de plain-pied, et pour un bâtiment de deux niveaux, les bureaux sont organisés autour de circulations éclairées naturellement par un patio central.

Pour un bâtiment tertiaire en Lorraine :

« Les puits de lumière peuvent permettre d'économiser deux heures par jour d'éclairage artificiel. »

Le shed, présent dans 4 bâtiments tertiaires, orienté au nord, pour 3 d'entre elles :

« Le shed capte la lumière abondante du ciel sans faire pénétrer les rayons du soleil. L'orientation et l'inclinaison du shed sont propices à une meilleure diffusion de la lumière. Le shed apporte une lumière agréable et une intensité lumineuse relativement élevée, quasiment constante au cours de la journée et tout au long de l'année, appréciée des usagers qui même en plein hiver n'allument pas. »

L'éclairage naturel n'est toutefois pas toujours en adéquation avec la position des plans de travail.

Dans une école en Lorraine :

« Malgré le nombre important de fenêtres, pour 90 % des mesures prises l'éclairage naturel est insuffisant pour le confort visuel (145 lux) car la lumière naturelle arrive dans le dos de l'élève, qui fait de l'ombre sur sa table; ce qui nécessite d'allumer les lumières alors que le temps est clair. »

Des solutions combinant des apports lumineux naturels avec une maîtrise des apports solaires en saison chaude

La pénétration de la lumière du jour permise par la conception des baies, par des lanterneaux, par des sheds ou par des patios est parfois bien étudiée au regard de son interaction avec les apports solaires induits, sources de gains en hiver, mais aussi de d'inconfort en été, ou de consommation de rafraîchissement.

Inversement une protection solaire excessive en période de faible luminosité du ciel engendre des consommations d'éclairage artificiel, voire des consommations de chauffage supplémentaires.

La modularité de la protection solaire et sa différenciation avec la protection lumineuse permettent une optimisation de ces deux types d'apports naturels.

Pour un bâtiment tertiaire en Languedoc-Roussillon :

« La mise en place de vitrages verticaux en couronnement de patio fermé par une toiture opaque permet un éclairage naturel abondant au cœur du bâtiment tout en évitant les apports solaires excessifs en été.



La consommation annuelle d'éclairage est divisée par 3,7 par rapport au calcul réglementaire.
La consommation de climatisation est également inférieure à la consommation conventionnelle, de 13,8 kWh_{ep}/m².an au lieu de 20,6 kWh_{ep}/m².an. »



Au-delà de ces apports techniques centrés sur les systèmes mis en œuvre et les consommations résultantes, les évaluations du Cerema ont également abordé l'éclairage de façon plus globale, en intégrant le point de vue de l'utilisateur et son confort en lien avec l'accès à la lumière naturelle.

Cette étude d'ordre sociologique témoigne, sur le panel qui lui est propre, d'un accès **plutôt satisfaisant à la lumière naturelle** en résidentiel comme en tertiaire, **bien que pour le tertiaire, la lumière artificielle soit régulièrement utilisée en journée** (§ 7.7).

5.6.3 Parties privatives des logements

L'illustration 163 présente la consommation d'éclairage moyenne mensuelle par logement en énergie primaire, pour 40 logements de l'échantillon. La courbe représente la durée nocturne mensuelle moyenne en France.

Illustration 163 - Consommations mensuelles moyennes d'éclairage dans 40 logements et MI

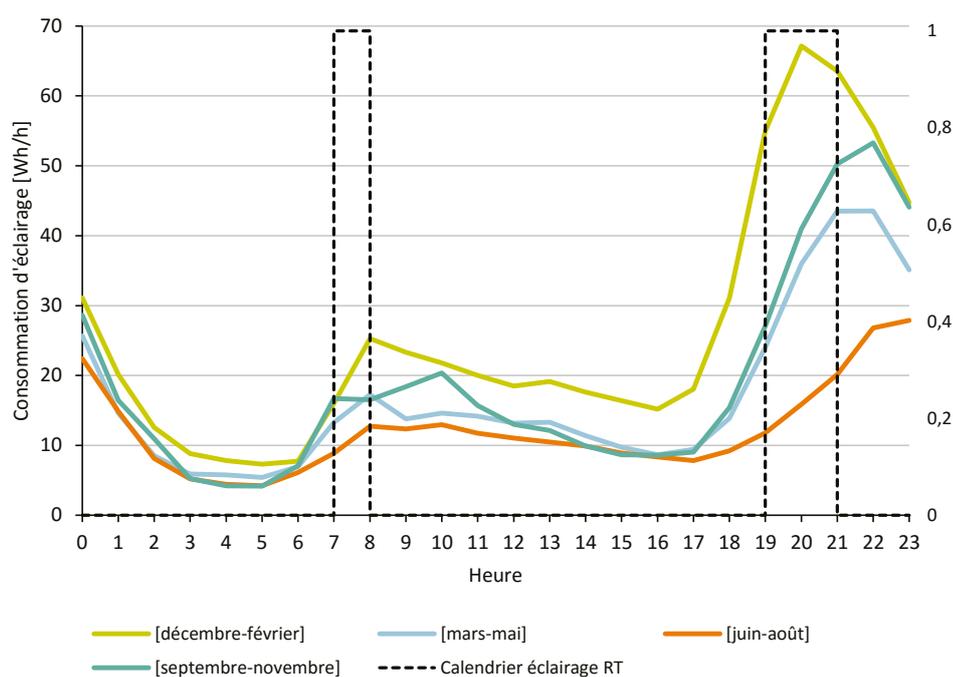


La consommation d'éclairage dans les logements et la durée nocturne sont corrélées. La variation saisonnière de la durée d'ensoleillement semble être un indicateur suffisant pour expliquer les fluctuations mensuelles des consommations d'éclairage en résidentiel.

En moyenne, pour ces 40 logements, la consommation est supérieure à 40 kWh_{ep}/mois de novembre à février. Elle est inférieure à 25 kWh_{ep}/mois uniquement de juin à août.

Le même graphe a été tracé en prenant cette fois la consommation moyenne par heure dans l'année, pour chaque trimestre.

Illustration 164 – Moyenne des consommations horaires d'éclairage dans 40 logements pour chaque trimestre



Le pic de consommation dans les logements suivis se situe entre 20 h et 22 h, avec une puissance appelée supérieure à 60 Wh/h en hiver. Cette tranche horaire correspond assez bien au calendrier des réglementations thermiques (éclairage de 19 h à 22 h).

Le matin, le pic est plus faible du fait que le jour est levé (sauf en hiver). La consommation est la plus importante entre 8 h et 10 h. Cela représente une heure de décalage avec le scénario RT, qui prévoit un allumage de 7 h à 9 h.

En journée, en revanche, les consommations ne sont pas nulles. La puissance appelée est en moyenne de 20 W en hiver, de 12 W en été. Dans le scénario réglementaire, on considère une consommation nulle sur la plage 9 h-18 h.

Remarque: pour les mois d'été, les pics d'éclairage semblent décalés par rapport au scénario RT. Les habitudes des occupants ne changent pas nécessairement. Il est probable que les enregistreurs n'ont pas pris en compte le changement d'heure.

L'illustration 163 présente une moyenne sur 40 logements. En regardant le profil des consommations des logements un par un, on constate une forte disparité entre logements :

- pour 22 logements (sur 40), les consommations en journée sont quasi nulles ;
- 4 logements montrent une utilisation de l'éclairage importante toute la journée, dont un avec un appel de puissance continu de 60 W ;
- les consommations sont très variables d'un logement à l'autre dans un même bâtiment d'habitat collectif.

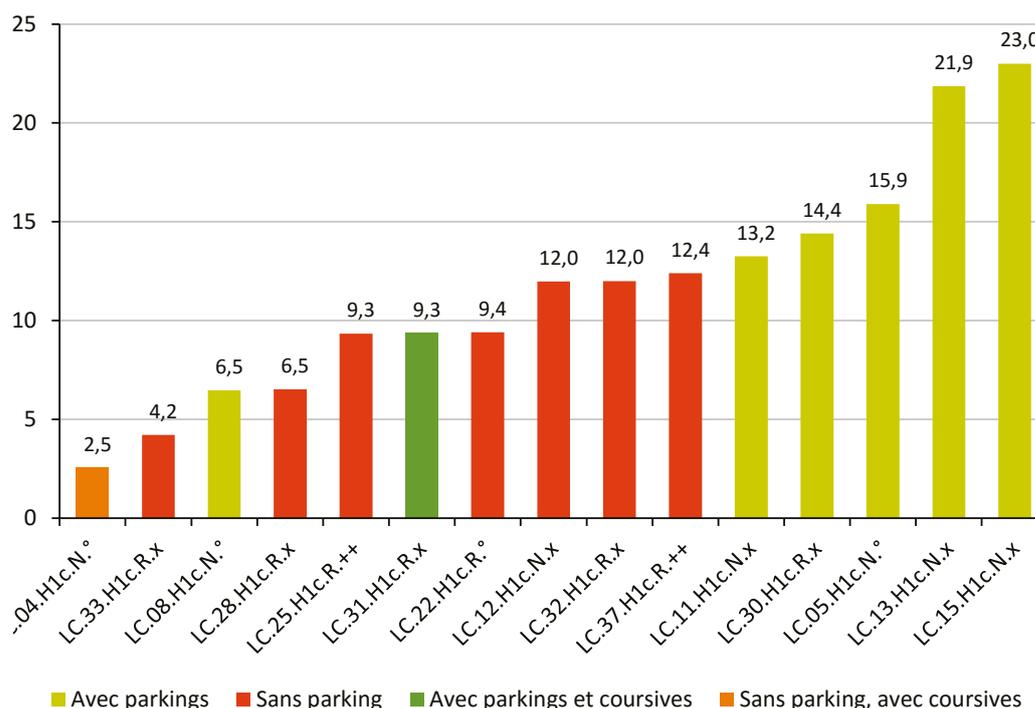
Les variations ne peuvent pas être attribuées à la conception du bâtiment.

Les différences s'expliquent par des types d'occupation différents et par le comportement des occupants. Elles s'expliquent également par l'absence de mesure des consommations des éclairages sur pied, sous-évaluant les consommations dans certains cas.

5.6.4 Parties communes en habitat collectif

L'illustration suivante présente différentes compositions de la consommation d'éclairage des parties communes.

Illustration 165 – Consommations annuelles d'éclairage des parties communes (intérieur + extérieur + parkings)



La consommation d'éclairage des parties communes et extérieures en habitat collectif est plus faible lorsqu'il n'y a pas de parking souterrain.

Elle est aussi plus faible lorsque l'accès aux logements se fait par des coursives extérieures.

En l'absence de parking souterrain, la consommation d'éclairage des parties communes se situe entre 4 et 12 kWh_{ep}/m².an, soit un facteur 3 entre les bâtiments, dû à :

- une architecture différente (parties communes aveugles ou non) ;
- à des modes de commande différents pour l'éclairage intérieur (voir graphe ci-après) ;
- des dérives potentielles de la commande.

Avec des parkings souterrains, sauf exception, la consommation de l'éclairage est bien plus élevée. Elle est supérieure à 12 kWh_{ep}/m².an, et dépasse 20 kWh_{ep}/m².an sur 2 opérations.

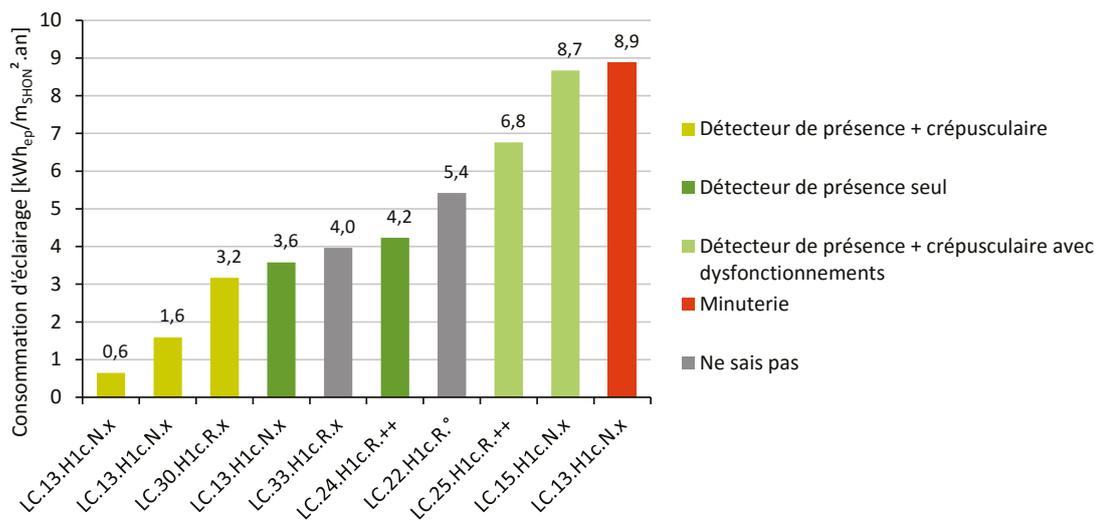
Éclairage des parties communes limitées aux halls et couloirs des logements collectifs

La consommation de l'éclairage des parties communes hors parkings et extérieurs s'étend de 0,65 à 9 kWh_{ep}/m².an.

La comparaison entre les bâtiments est délicate puisqu'on ignore lesquels ont des parties communes aveugles ou non. Par ailleurs, à nombre de logements constant, la surface des parties communes varie, faisant également varier la consommation.

Néanmoins, un effet de la commande d'éclairage choisie à la conception des espaces communs est observable sur l'échantillon conservé.

Illustration 166 – Consommation d'éclairage des halls et des couloirs en logements collectifs



Sur l'échantillon :

- le couple « détecteur de présence + crépusculaire » est le plus adapté pour limiter les consommations des parties communes à condition d'avoir un pilotage par zone d'éclairage naturel homogène, et non par luminaire pour limiter les consommations de veille ;
- pour un fonctionnement optimal, il faut veiller en conception à avoir une commande par zone d'éclairage naturel homogène ;
- la commande « détecteur de présence » seule est moins efficace, mais permet tout de même des consommations maîtrisées si les temps de temporisation sont bien réglés dans tous les locaux. Des temps de temporisation très longs, supérieurs à 10 minutes, ont été détectés dans certains locaux ;
- les consommations sont plus élevées lorsque les parties communes sont équipées d'un minuteur. Surtout à cause d'une temporisation longue, supérieure à 6 minutes sur cette opération à certains endroits. Ce résultat est valable pour les zones fréquemment utilisées (couloirs, escaliers...). Pour les locaux peu utilisés (locaux techniques) il a été montré sur une opération que cette commande était plus efficace, la consommation de veille des détecteurs de présence étant plus importante que les consommations d'éclairage ;
- l'éclairage permanent d'une seule zone, aussi petite soit-elle, augmente de façon importante les consommations.

À retenir

En habitat collectif, dans les halls et circulations, le système le plus performant associe un détecteur de présence dans les parties aveugles, ou un détecteur de présence couplé à un capteur de luminosité s'il y a de l'éclairage naturel, avec une commande commune aux zones éclairées naturellement et de façon homogène.

Les éclairages permanents, même dans de petits locaux, génèrent des consommations importantes.

5.6.5 Bâtiments tertiaires

L'éclairage en période d'inoccupation

Contrairement aux logements, le tertiaire montre des périodes d'inoccupation selon l'usage. La consommation d'éclairage a pu être répartie en périodes d'occupation et d'inoccupation pour 8 bâtiments : 3 écoles, 2 crèches, 2 bureaux et une maison de santé.

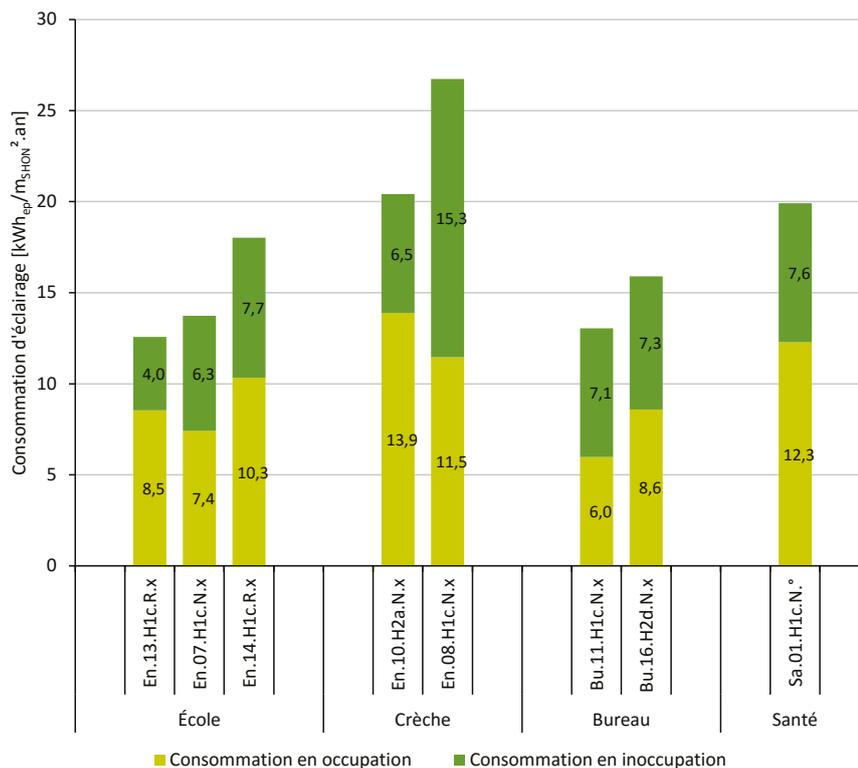
Il ressort que la consommation en période d'inoccupation est proche de 7 kWh_{ep}/m².an pour l'éclairage dans 6 bâtiments sur 8 (à ± 10 %).

Dans un cas la consommation est inférieure : 4 kWh_{ep}/m².an. Dans un autre, elle est très largement supérieure : 15 kWh_{ep}/m².an. Dans ce dernier cas, la dérive est liée à l'éclairage extérieur et aux salles de classe.

La part de la consommation d'éclairage en inoccupation est comprise entre 32 et 57 % de la consommation totale annuelle de l'éclairage.

En occupation, la consommation est variable d'un bâtiment à l'autre.

Illustration 167 - Consommation d'éclairage annuelle en occupation et en inoccupation dans 8 bâtiments tertiaires



Les fortes consommations en inoccupation sont surtout dues à l'éclairage extérieur (§ 5.6.7).

Elles s'expliquent également par la veille des détecteurs installés (§ 5.6.9).

À retenir

Sur l'échantillon tertiaire, les consommations d'éclairage en période d'inoccupation représentent plus de 30 % des consommations totales d'éclairage, et plus de 40 % pour la majeure partie des bâtiments.

Les éclairages permanents, notamment extérieurs, en sont une première explication.

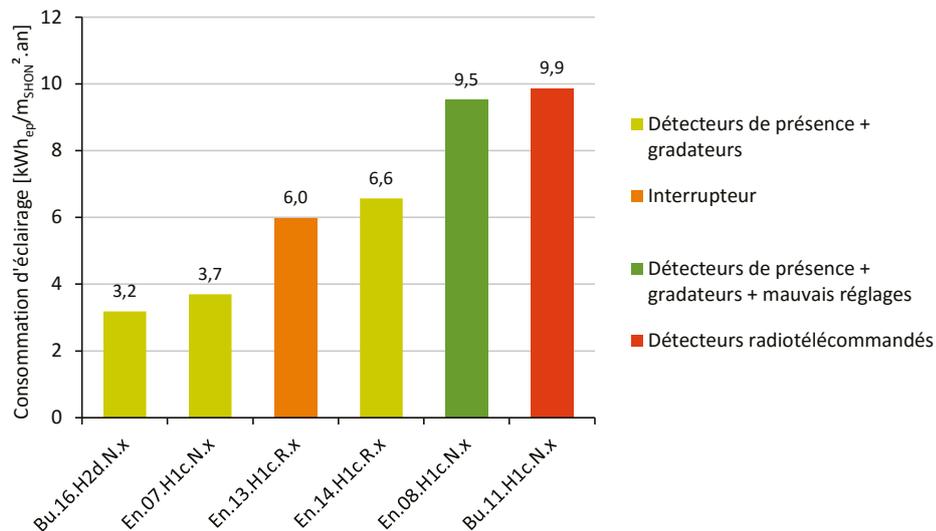
Bureaux et salles de classe

Pour les locaux de travail (bureaux ou salles de classe dans les écoles), la consommation d'éclairage varie de 3 à 10 kWh_{ep}/m².an.



La variation semble surtout liée au pilotage des installations.

Illustration 168 – Consommation de l'éclairage dans les salles de classe et les bureaux



L'illustration 168 montre que :

- lorsque l'éclairage est piloté par des détecteurs de présence couplés à des gradateurs, les consommations sont limitées (s'il n'y a pas de dysfonctionnements) ;
- lorsque l'éclairage est commandé par des interrupteurs, la consommation est proche du cas « détecteur de présence ». Pourtant dans cette école, les instituteurs ne semblent pas avoir été particulièrement sensibilisés aux économies d'énergie. On peut alors se poser des questions. Est-ce qu'en école, il est suffisant de mettre des interrupteurs dans les salles de classe ? Les résultats obtenus ici seront-ils répliquables ailleurs ?

La même question se pose pour les bureaux individuels. Est-ce qu'un interrupteur ne suffira pas ?

Les interrupteurs sont en revanche à proscrire dans les locaux communs :

« L'utilisation d'interrupteurs simple allumage dans les circulations conduit à ce que l'éclairage reste allumé, ce qui entraîne des gaspillages conséquents. »

- dans le dernier cas, les luminaires sont pilotés par des détecteurs radiocommandés (interrupteurs sans fil). Cet équipement, au-delà d'être peu efficace dans des bureaux (non-optimisation de la durée de fonctionnement), est consommateur en propre. Ainsi faut-il ajouter à cette consommation encore 0,97 kWh_{ep}/m².an de veille.

Concernant les détecteurs de luminosité, leur mode de fonctionnement n'est pas toujours étudié, et leur réglage effectué, pour limiter les consommations en prenant en compte l'usage.

Pour une école en Rhône-Alpes :

« Le détecteur de luminosité prend une mesure d'éclairement uniquement à l'arrivée des occupants. Tant que les occupants restent, la lumière reste allumée, même si l'éclairage naturel devient suffisant.

De plus la temporisation des détecteurs de présence est très longue. Lorsqu'il n'y a plus personne, les luminaires mettent 10 minutes à s'éteindre. »

Pour une école en Île-de-France :

« La lumière des salles de classe est entièrement pilotée par une sonde crépusculaire. Lorsqu'un instituteur ferme tous les rideaux pour projeter un document ou un film, la lumière artificielle s'allume. »

Pour une crèche en Rhône-Alpes :

« Si le seuil de non-allumage de l'éclairage artificiel est réglé trop haut ou que la position du capteur ne lui permet pas de donner une bonne information du niveau d'éclairage du local, les gains liés aux apports d'éclairage naturel sont nuls et seule la fonction de détection de présence reste bénéfique. »

À retenir

Dans les écoles et les bureaux, le détecteur de présence associé au détecteur crépusculaire semble optimal, s'il est bien positionné, si les seuils de luminosité sont bien réglés, et si l'utilisateur peut tout de même couper (ou allumer) l'éclairage manuellement.

Dans les salles de classe un simple interrupteur semble également très efficace.

En local sanitaire, des consommations maîtrisées

L'éclairage des sanitaires a été suivi dans 6 bâtiments : 4 écoles et crèches et 2 bureaux. À chaque fois, il y a des détecteurs de présence.

La consommation est assez faible sur toutes les opérations, comprise entre 0,26 et 0,61 kWh_{ep}/m².an.

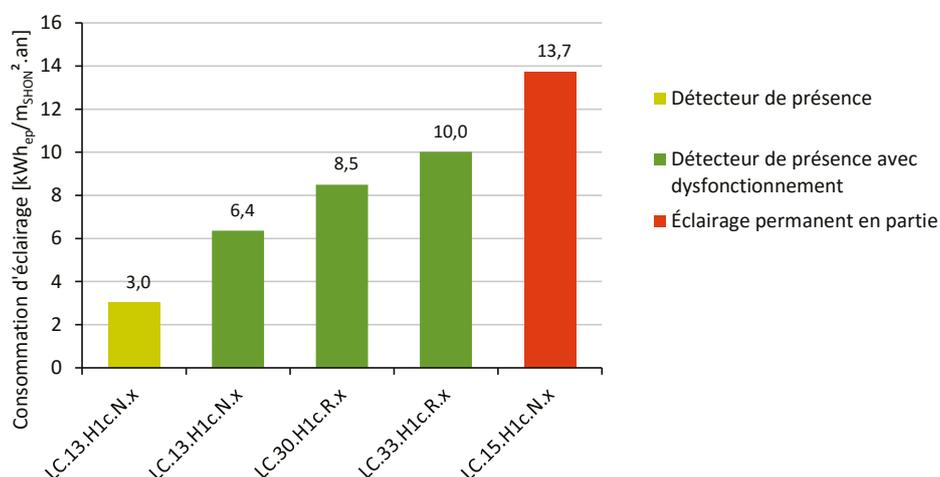
5.6.6 Parkings souterrains

La consommation de l'éclairage des parkings souterrains a été mesurée pour 7 opérations. Ces consommations sont ramenées à la SHON du bâtiment.

En habitat collectif, l'éclairage du parking souterrain représente 50 % à 70 % de la consommation d'éclairage des parties communes tous usages confondus, avec une consommation allant de 3 à plus de 13 kWh_{ep}/m².an.

Il est donc nécessaire d'être vigilant aux grandes surfaces à éclairer que représentent les parkings souterrains en optimisant les zones de détection, l'allumage et la temporisation.

Illustration 169 – Consommation annuelle des parkings souterrains en habitat collectif



L'éclairage des parkings est presque toujours piloté par un simple détecteur de présence, dans la mesure où ces zones sont aveugles.

Lorsque le fonctionnement est optimal, les consommations restent maîtrisées, comme dans le premier cas ci-dessus.

Cependant des anomalies viennent très vite augmenter cette consommation. Les surconsommations mesurées sur l'échantillon sont dues à :

- une temporisation trop longue de l'éclairage du parking, supérieure à 4 minutes à partir du moment où il n'y a plus personne (6 kWh_{ep}/m².an);
- un parking utilisé comme hall d'entrée du bâtiment, provoquant très régulièrement l'allumage des lampes (8,5 kWh_{ep}/m².an);
- une panne des détecteurs pendant un mois, induisant un éclairage permanent. À lui seul, ce mois représente 33 % de la consommation de l'éclairage des parkings (10 kWh_{ep}/m².an, soit 1 420 kWh_{ep}/m².an).

L'éclairage permanent des parkings est trop consommateur.

Pour un immeuble d'habitat collectif en Rhône-Alpes :

« L'éclairage du parking est permanent sur un tiers de sa surface. Cette partie est responsable de 80 % de la consommation totale du parking.

L'éclairage est piloté par des détecteurs de présence pour deux tiers du parking. Cette partie n'est responsable que de 20 % des consommations d'éclairage. »

À retenir

Les détecteurs de présence, avec un réglage de temporisation court, permettent d'obtenir les plus faibles consommations pour l'éclairage des parkings souterrains.

Un éclairage permanent, même localisé, aura pour effet de multiplier par 2 ou 3 la consommation.

5.6.7 L'éclairage extérieur : attention à son pilotage

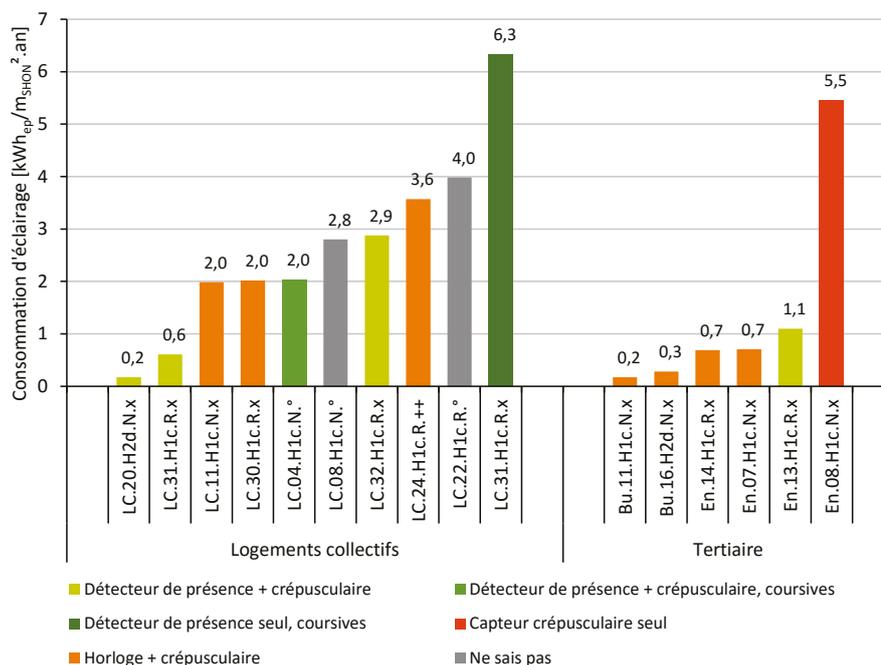
L'éclairage extérieur a été suivi dans 10 immeubles de logements collectifs, 2 bureaux, 3 écoles et une crèche. Sa consommation varie de 0,17 à 6,33 kWh_{ep}/m².an en habitat collectif.

Pour 6 bâtiments tertiaires, elle varie de 0,17 à plus de 5 kWh_{ep}/m².an dans un cas.



Les bâtiments les moins performants ont une consommation 40 fois plus élevée que les bâtiments les plus performants. L'écart est surtout lié au pilotage de l'éclairage, avec des choix non adaptés pour certains bâtiments.

Illustration 170 – Consommation d'éclairage des espaces extérieurs en tertiaire et habitat collectif



Sur l'illustration 170, les commandes d'éclairage « adaptées » et « inadaptées » apparaissent assez clairement.

Commande adaptée à l'éclairage extérieur :

- avec une commande associant **détecteur de présence et détecteur crépusculaire**, les consommations sont relativement faibles (excepté dans un cas).

La consommation est légèrement plus élevée pour le bâtiment avec coursive, car l'accès à tous les logements se fait par l'extérieur (pas de consommation d'éclairage dans les communs);

- la commande associant **détecteur crépusculaire et horloge** est très bien adaptée en tertiaire, pas du tout en habitat collectif.

En tertiaire, l'horloge est réglée uniquement sur les heures de présence, donc sans allumage la nuit. En revanche, en habitat collectif, l'horloge est réglée sur toute la nuit, d'où un éclairage permanent.

Commande non adaptée à l'éclairage extérieur :

- la commande avec détecteur de présence seul déclenche l'éclairage toute la journée dès qu'il y a un passage. L'opération concernée dans l'échantillon présente une consommation supérieure à 6 kWh_{ep}/m².an;
- la commande avec détecteur crépusculaire seul induit une consommation continue toute la nuit.

À retenir

Suivant la commande d'éclairage extérieur choisie, on observe un facteur 40 entre les consommations les plus faibles et les plus élevées.

Les plus faibles consommations d'éclairage extérieur sont obtenues avec une commande qui associe :

- détecteur de présence et détecteur crépusculaire en habitat collectif;
- horloge et détecteur crépusculaire en tertiaire.

Installés seuls, le détecteur de présence, le détecteur crépusculaire ou l'horloge génèrent toujours des consommations plus élevées.

5.6.8 L'adaptation aux locaux, clé de la performance de la commande d'éclairage



Après avoir observé les spécificités de la commande d'éclairage selon les fonctions et configurations des bâtiments et espaces, dans lesquels des mesures et des constats d'usage ont pu être effectués, il est possible de dégager les clés de la **performance de la commande d'éclairage par son adaptation aux locaux**, gage d'une consommation maîtrisée.

À retenir

L'enjeu énergétique réside dans l'**extinction automatique** de l'éclairage artificiel lorsque le local est inoccupé et/ou lorsqu'il bénéficie d'un **éclairage naturel suffisant**, tout en s'assurant que le dispositif d'automatisation n'est pas consommateur. Ainsi, un équipement de commande performant prend en compte :

- la fréquence d'usage du local (ex : un minuteur est performant pour un local technique);
- la durée d'arrêt de l'éclairage au regard des consommations de veille (ex : une programmation des plages d'arrêt permet une coupure totale des auxiliaires de gradateur);
- l'accès à la lumière naturelle (ex : une coupure crépusculaire bien réglée est performante pour un espace extérieur à forte fréquentation nocturne);
- le zonage de l'éclairage : un même dispositif de commande ne doit pas piloter des zones à usages différents (ex : hall et parking) ou des zones d'accès à l'éclairage naturel très différents (ex : parties sombres de circulation);
- l'homogénéité de l'éclairage naturel dans le local (ex : un gradateur permet d'apporter un apport artificiel limité aux parties qui en ont besoin);
- un réglage fin des détecteurs, gradateurs et temporisations pour éviter des temps de fonctionnement excessifs.

5.6.9 Consommation de veille des équipements de commande de l'éclairage

Le système d'optimisation d'éclairage par gradateurs ou détecteurs de présence, lorsqu'il est à l'arrêt, consomme une énergie de veille non négligeable. Cela limite l'efficacité énergétique de l'installation.

Les détecteurs de présence

La consommation de veille des détecteurs de présence est permanente, que la lumière soit allumée ou pas. Elle est de l'ordre de 1 à 3 W par appareil pour quelques opérations renseignées de l'échantillon.

Le problème est à relativiser par rapport aux évolutions du matériel : les modèles actuellement sur le marché consomment moins de 1 W, jusqu'à 0,25 W pour les modèles les plus performants.

Pour un détecteur ayant une puissance continue de 3 W :

« La consommation annuelle du détecteur sera de 26 kWh_{ef}/an, ou 68 kWh_{ep}/an.

S'il y a 100 détecteurs de présence dans le bâtiment, la consommation induite sera de 6 800 kWh_{ep}/an. »

Pour un local dont le besoin d'éclairage en durée est faible (tel que les locaux d'archives, les locaux d'entretien, les locaux techniques, les douches du personnel...), la consommation du détecteur de présence représente une part importante de la consommation annuelle de l'éclairage du local.

Sur une opération en Rhône-Alpes suivie par un bureau d'études :

« La consommation du détecteur de présence peut devenir tout à fait anormale en valeur relative, jusqu'à 83 % de la consommation totale du local. Une minuterie est alors souvent mieux adaptée qu'un détecteur de présence pour les éclairages très peu sollicités annuellement. »

Les détecteurs de lumière (crépusculaires / gradateurs)

Sur une opération de 2006, la puissance des gradateurs en « veille » a été mesurée à 18 W en moyenne.

Pour un immeuble de bureau en Rhône-Alpes :

« 8 à 10 % de la consommation totale d'éclairage, soit 0,6 à 0,8 kWh/m²/an, sont absorbés par les BAES, détecteurs de présences, capteurs crépusculaires, modules récepteurs haute fréquence qui commandent les luminaires de plateaux de bureaux. »

Pour une école en Rhône-Alpes :

« Près de 30 % des consommations d'éclairage sont imputables aux équipements de veille (BAES, détecteurs de mouvements et détecteurs crépusculaires). »

Pour optimiser les gains énergétiques, il s'avère pertinent :

- de sélectionner les auxiliaires selon leur consommation de veille ;
- de réserver ces détecteurs aux installations ayant des durées annuelles de fonctionnement suffisantes afin que la consommation de veille soit lissée dans la consommation d'éclairage ;
- d'étudier la possibilité de coupure de l'alimentation de ces auxiliaires hors fonctionnement ;
- voire de revenir à un simple interrupteur pour les locaux peu utilisés.

5.6.10 Les occupants, victimes de l'automatisation des commandes



En présence de lumière du jour : rejet de l'éclairage artificiel

L'automatisation du déclenchement de l'éclairage artificiel dans des locaux pouvant bénéficier de la lumière du jour est souvent mal vécue par les occupants, en particulier en absence de gradateur de lumière. En effet, l'allumage se voit immédiatement et conduit l'occupant à rejeter un service qu'il n'a pas demandé et qu'il considère alors comme un gaspillage d'énergie. Il est préférable de recourir à un allumage manuel, ou sinon, il est nécessaire pour ces espaces d'associer des gradateurs aux détecteurs.

En l'absence de lumière du jour : des déclenchements intempestifs

Les suivis font apparaître des retours contrastés quant aux détecteurs de présence et interrupteurs crépusculaires. Dans certains cas, il y a peu de plaintes alors que dans d'autres, l'inconfort est manifeste. Cela semble notamment dû au mauvais positionnement vis-à-vis des occupants et au réglage de temporisation.

Pour les bureaux, le choix d'une double source de lumière avec une base plafonnier d'intensité moyenne de 150 lux et un éclairage ponctuel réglable sur la tâche de travail, semble une très bonne solution en termes d'usage.

Pour les bâtiments d'enseignement, un système de pilotage semi-automatique permet à l'utilisateur de décider d'allumer la pièce (enjeu de son confort), le système ne gérant que la gradation et l'extinction. La gradation permet de compenser les surdimensionnements en puissance des installations.

Pour une crèche, lors de la pratique d'activités calmes, les occupants subissent des arrêts intempestifs et fréquents de l'éclairage. Augmenter la temporisation des détecteurs permet de réduire cette gêne mais impacte fortement la consommation d'électricité.

Ce dysfonctionnement provient d'un mauvais choix pour un détecteur de mouvement plutôt que pour un détecteur de présence avec temporisation.

5.7 Autres équipements immobiliers

Ce chapitre traite des performances énergétiques des autres équipements immobiliers tels que les ascenseurs, les équipements de sécurité incendie ou les portes automatiques, dont la consommation n'est pas soumise à la réglementation thermique. Il s'agit de tous les équipements immeubles, au sens juridique du terme³³, qui consomment de l'énergie mais n'entrent pas dans le cadre de la RT 2005 ou 2012.

5.7.1 Consommation d'électricité et répartition selon l'usage

La consommation électrique des équipements immobiliers a été suivie spécifiquement sur 7 opérations tertiaires et 7 opérations résidentielles. Pour comprendre l'enjeu que représente la consommation électrique des « autres équipements immobiliers », il faut la situer par rapport à celle des autres équipements consommant de l'électricité dans le bâtiment. Puis, pour identifier les leviers pouvant réduire cette consommation, il s'agira de cerner les usages les plus consommateurs d'électricité.

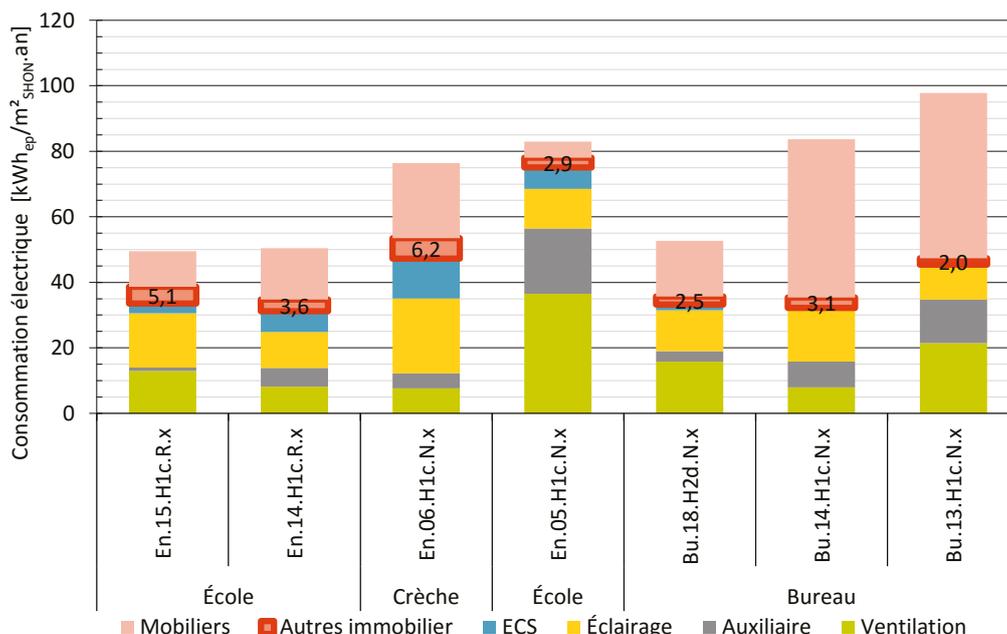
Une consommation d'électricité non négligeable

En tertiaire, les équipements immobiliers ont une consommation comprise entre 2 et 6 kWh_{ep}/m².an. Chiffre non neutre dans un bâtiment BBC. Elles semblent plus élevées dans les écoles que dans les bureaux.

En résidentiel, cette consommation peut monter jusqu'à 11 kWh_{ep}/m².an.

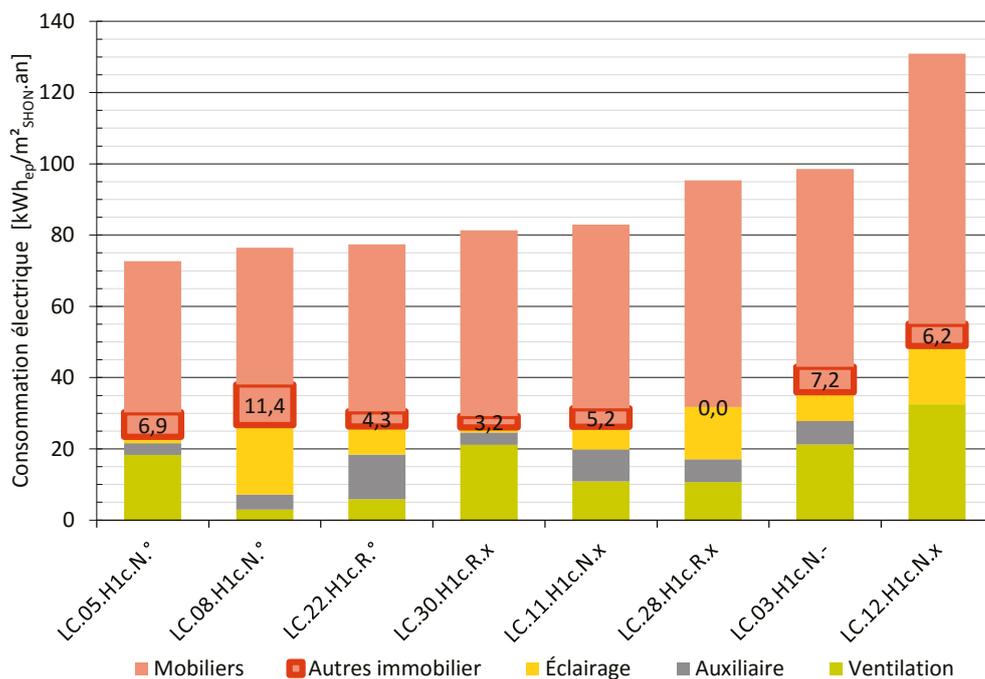
La répartition des consommations électriques dans ces bâtiments est montrée sur le graphe ci-dessous. Pour plus de lisibilité et pour pouvoir comparer les bâtiments entre eux, les consommations électriques liées à la production de froid ou de chaud (pour le chauffage, la climatisation ou l'ECS) ont été écartées. En effet, le recours à l'électricité n'est pas systématique pour assurer ces fonctions (exemple : la chaudière à condensation, le panneau solaire...). Les consommations des auxiliaires sont préservées puisqu'ils utilisent toujours l'énergie électrique pour fonctionner.

Illustration 171 – Part des équipements immobiliers dans les consommations électriques dans 4 écoles et 3 bureaux



33. Dans le sens juridique du terme, i.e. il s'agit bien d'un équipement qu'on ne peut pas déplacer.

Illustration 172 – Part des équipements immobiliers dans les consommations électriques dans les logements collectifs



Une répartition hétérogène des usages qui dépend des particularités de chaque bâtiment

Ces consommations ont été analysées dans les 3 bureaux, les 3 écoles, la crèche et 5 logements collectifs.

Il ressort qu'à chaque fois, ces consommations sont majoritairement dues aux ascenseurs et à l'éclairage de sécurité en tertiaire. Pour les logements, le véritable enjeu porte sur les ascenseurs.

Illustration 173 – Répartition des consommations électriques des équipements immobiliers en tertiaire

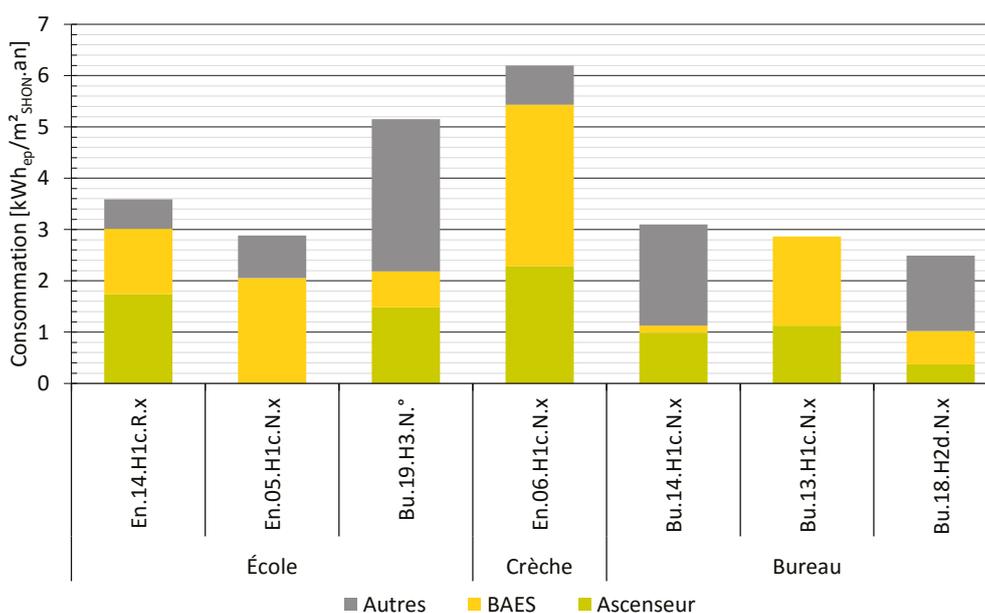
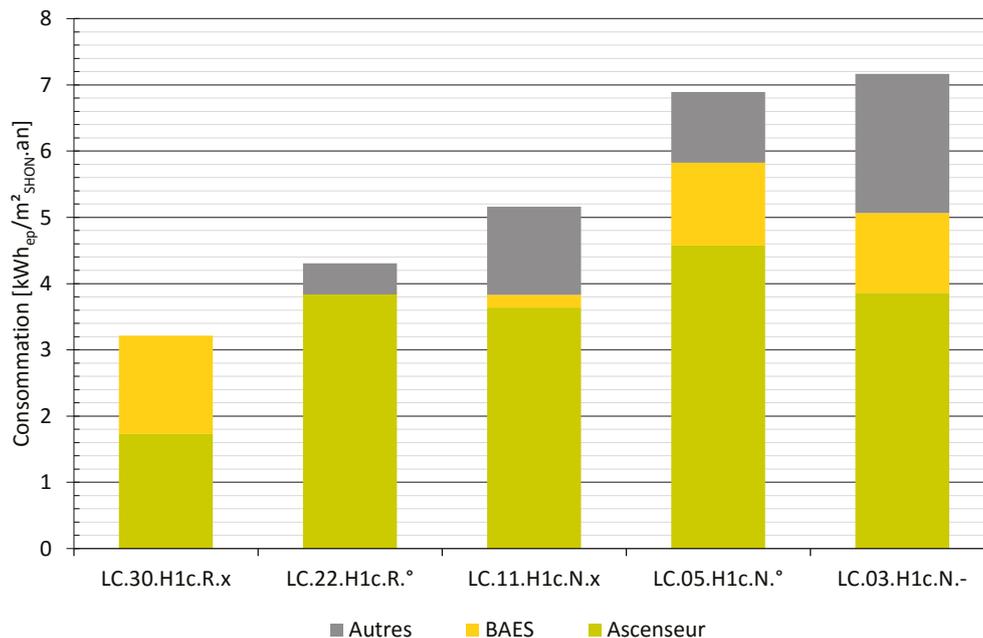


Illustration 174 – Répartition des consommations électriques des équipements immobiliers en logements



Sur la crèche :

« En additionnant les consommations de l'éclairage de sécurité, et de l'unique ascenseur du bâtiment, on est déjà à presque 5,5 kWh_{ep}/m².an. Dommage... »

Sur une opération de logements collectifs :

« La consommation des ascenseurs représente à elle seule plus de 4,5 kWh_{ep}/m².an. »

La catégorie « autres » regroupe notamment les volets roulants, les brise-soleil, la cafétéria, les pompes de récupération d'eau de pluie³⁴, et divers appareils électriques.

Ces équipements n'ont malheureusement bénéficié d'un suivi que sur peu d'opérations. Les mesures montrent tout de même que certains appareils peuvent avoir une consommation non négligeable ou anormalement élevée.

Sur une école :

« Il y a une dérive sur un sèche-mains dans les sanitaires. À lui seul il consomme 1 kWh_{ep}/m².an. »

À retenir

Les équipements immobiliers sont globalement très peu suivis dans les campagnes de mesures, et leurs consommations restent méconnues.

Avec une consommation souvent supérieure à 5 kWh_{ep}/m².an, il s'agit pourtant d'un enjeu important dans les bâtiments de demain, qui pèsera sur le bilan énergétique.

La consommation est surtout liée aux ascenseurs et à l'éclairage de sécurité.

Ces équipements ne doivent pas être négligés dans de prochaines campagnes de mesures.

34. La consommation des pompes de récupération d'eau de pluie fait l'objet d'un paragraphe spécifique.

5.7.2 Zoom sur les ascenseurs

Les ascenseurs ont été spécifiquement suivis sur 10 opérations tertiaires et 5 logements collectifs.

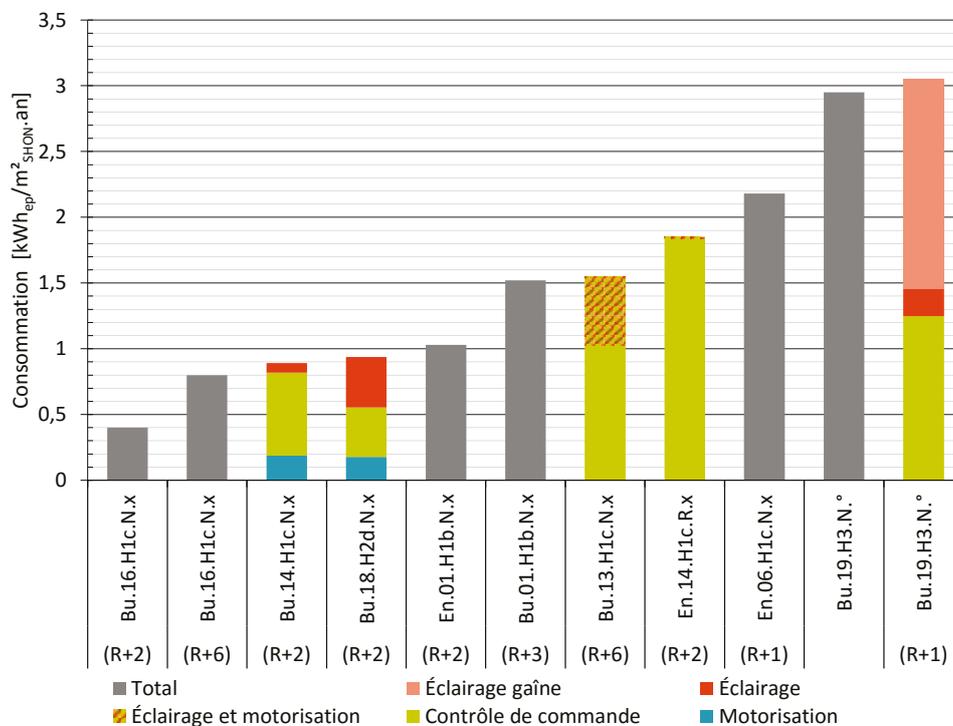


Les bâtiments suivis sont tous de faible hauteur, allant du R +1 au R +6.
Les conclusions ne s'appliqueront pas pour des bâtiments de grande hauteur.

Des consommations variables...

Dans les bâtiments tertiaires, les mesures montrent des consommations de 0,4 à 3 kWh_{ep}/m².an, avec une grande disparité par poste (contrôle de commande, éclairage de la cabine et motorisation), mais aussi en puissance de veille.

Illustration 175 – Consommation des ascenseurs répartie par poste en tertiaire



Pour les deux ascenseurs les moins consommateurs :

« Les deux ascenseurs ayant la plus faible consommation sont dans le même bâtiment. Ils bénéficient :

- d'une faible puissance de veille avec un éclairage cabine bien asservi;
- d'une utilisation limitée par les usagers, par la mise en place d'escaliers agréables et d'un ascenseur lent (1 m/s). Seulement 35 % des usagers utilisent l'ascenseur pour monter, 10 % pour descendre. »

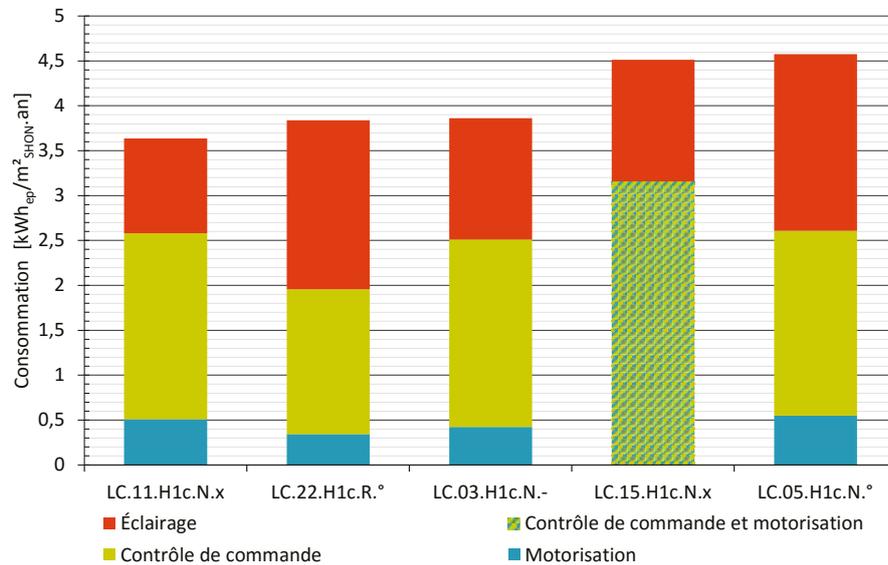
Pour une école et une crèche :

« Dans ces deux cas, l'ascenseur a une consommation de 2,2 et 3 kWh_{ep}/m².an, alors qu'ils ne sont jamais utilisés (fonctionnement avec une clé).

Cette consommation est uniquement due à une puissance de veille très importante (probablement un éclairage permanent). »

Dans les bâtiments résidentiels, la consommation des ascenseurs varie entre 3,5 et 4,5 kWh_{ep}/m².an. L'armoire de contrôle consomme entre 42 % et 57 % de cette énergie. Pour un ascenseur, la puissance de cet organe de contrôle peut varier de 75 W à 230 W. Le second poste de consommation est l'éclairage de la cabine (entre 30 % et 50 % de la consommation).

Illustration 176 – Consommation des ascenseurs répartie par poste en habitat collectif

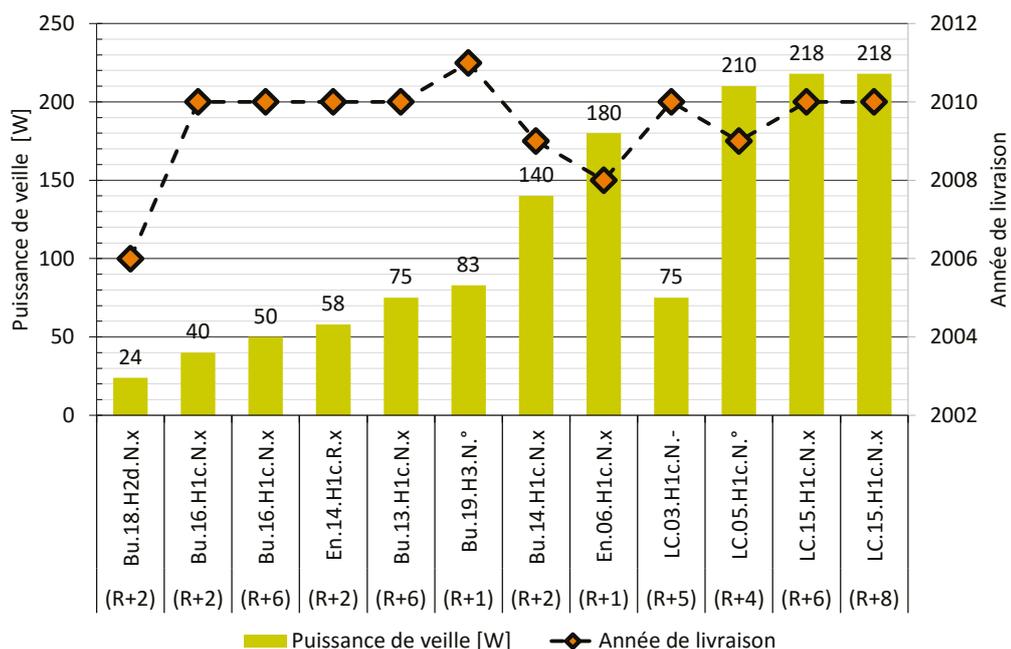


Des consommations liées à une puissance de veille variable

Sur notre échantillon, l'écart de consommation entre différents ascenseurs ne vient pas du nombre d'étages du bâtiment, mais surtout de la consommation de veille de l'ascenseur, allant de 24 à 218 W. Soit un rapport de 9 entre les plus et les moins performants !

Cette puissance de veille n'est pas corrélée à la date d'installation de l'ascenseur, mais à son choix lors de la conception.

Illustration 177 – Puissance de veille de 12 ascenseurs



L'amplitude importante des puissances de veille est due à un panneau de contrôle très consommateur (allant jusqu'à 215 W sur une opération), et à la gestion de l'éclairage.

Sur les 24 ascenseurs suivis en tertiaire et résidentiel :

- 13 ont un éclairage permanent ;
- 7 ont une mauvaise temporisation de l'éclairage (supérieure à 30 minutes) ;
- seulement 4 ont une gestion correcte de l'éclairage de la cabine.

La puissance d'éclairage installée influe également sur la consommation de l'ascenseur.

Dans 2 ascenseurs de même taille, sur deux opérations différentes :

« Dans un cas il a été mis des LEDS, d'une puissance totale de 12 W.

Dans le second cas, ont été installés trois tubes fluorescents de 36 W chacun, soit une puissance totale de 108 W. »

À titre de comparaison, pour assurer le niveau d'éclairage d'une cabine d'ascenseur de grande taille³⁵, une installation de tubes fluorescents de 30 W ou de LEDS de 25 W peut suffire.

Une attention particulière doit également être portée à l'éclairage de la gaine ascenseur. Sur une opération, cette gaine est restée allumée toute l'année, représentant plus de 50 % des consommations totales de l'ascenseur.

Or la mise en place d'un dispositif simple permettrait d'éviter cela. Ainsi, un voyant lumineux placé à proximité de l'interrupteur commandant l'éclairage de la gaine permettrait de contrôler son état de marche en absence d'intervention et de l'éteindre en conséquence.

À retenir

La consommation des ascenseurs varie de :

- 0,4 à 3 kWh_{ep}/m².an dans les bâtiments de bureaux ;
- 1,5 à 4,5 kWh_{ep}/m².an en habitat collectif.

Elle varie surtout en fonction de la puissance de veille, allant de 24 W à 218 W, puissance de veille qui dépend :

- de l'éclairage de la cabine (permanent dans plus de 50 % des cas, avec une puissance installée souvent surdimensionnée) ;
- et du contrôle commande de la cabine.

La part de la motorisation est minime (pour des immeubles limités à 7 étages).

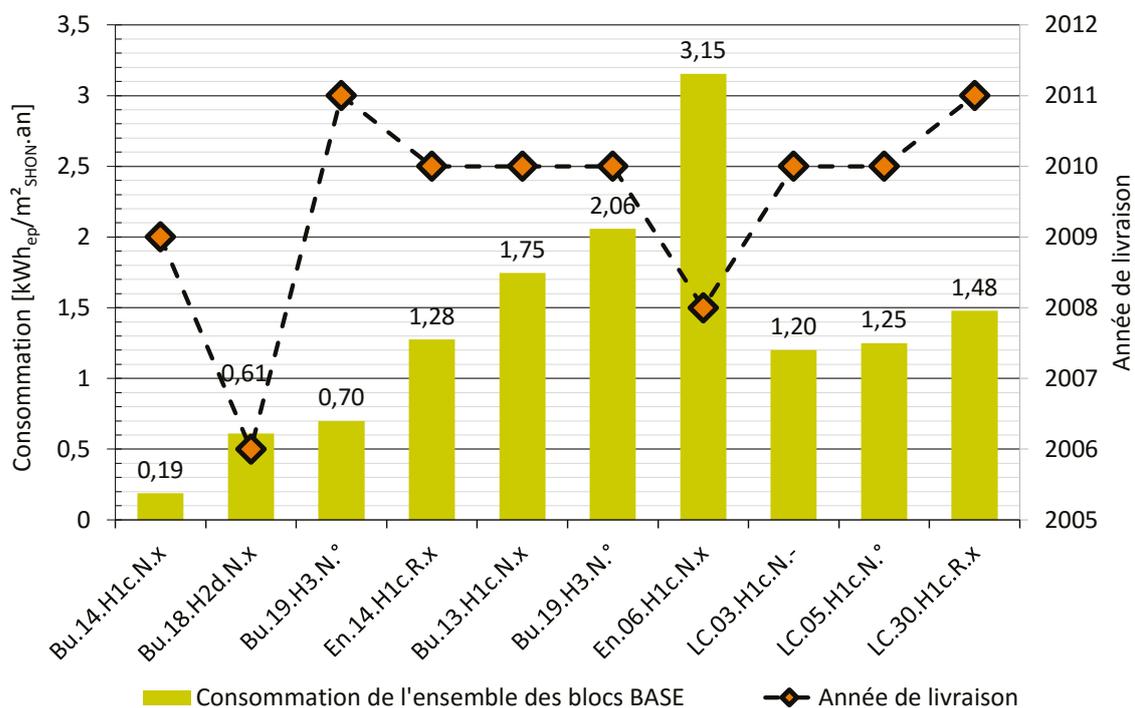
35. D'après la norme EN 81-20, 100 lx pour une cabine d'ascenseur de type 3 (cabine de 2 m x 1,4 m).

5.7.3 Zoom sur l'éclairage de sécurité

Des données sur les blocs autonomes d'éclairage de sécurité (BAES) sont disponibles pour 10 opérations: 3 bureaux, 3 écoles, une crèche et 3 logements collectifs.

Les consommations vont de 0,2 à 3,15 kWh_{ep}/m².an. Soit un facteur 15 entre les opérations! Pour le logement collectif, les consommations se situent dans les trois cas aux alentours de 1,3 kWh_{ep}/m².an. Les référentiels et règles d'installation des BAES sont propres à la fonction du bâtiment. Ainsi, à surface SHON constante, le nombre de BAES installés varie selon la fonction du bâtiment.

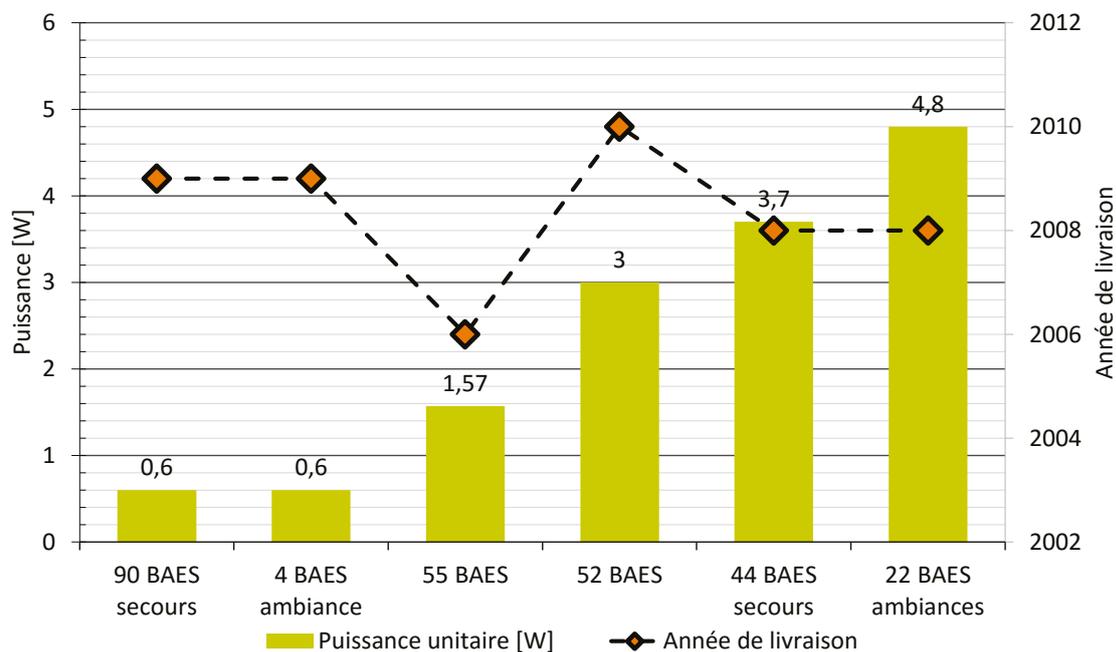
Illustration 178 - Consommation de l'éclairage de sécurité



Ces écarts ne dépendent pas de l'année d'installation, mais du choix des BAES à la conception. Les BAES ont un fonctionnement permanent, par conséquent leur puissance est le facteur de consommation prépondérant.

Le graphe ci-après donne les puissances unitaires des BAES dans différentes opérations, allant de 0,6 à 4,8 W/BAES. Soit un facteur 8 suivant le choix initial.

Illustration 179 - Puissance unitaire des blocs BAES



Ces puissances induisent une consommation annuelle par bloc BAES comprise entre 13,5 kWh_{ep}/bloc.an et 108 kWh_{ep}/bloc.an.

À retenir

Suivant les blocs autonomes d'éclairage de sécurité (BAES), la consommation liée à la sécurité incendie variera de 14 à 108 kWh_{ep}/bloc.an (soit dans un rapport de 1 à 8). Cette consommation est entièrement liée au matériel choisi lors de la conception. Une vigilance particulière doit être apportée à ce choix.

5.7.4 Zoom sur la récupération d'eau de pluie

Sur trois opérations, l'eau de pluie est récupérée pour alimenter les sanitaires. La pompe a été suivie.

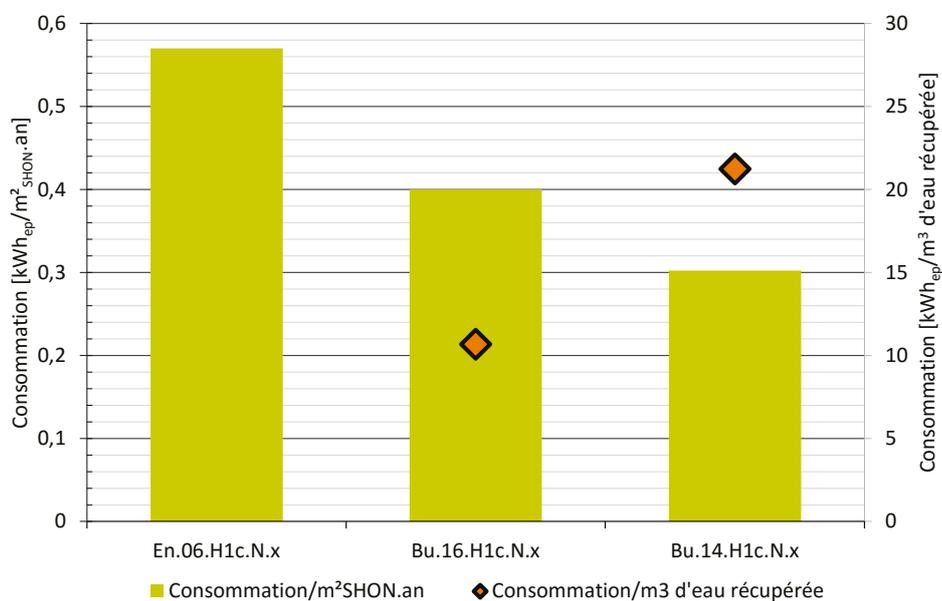
La consommation est comprise entre 0,3 et 0,6 kWh_{ep}/m².an. Elle dépend du volume d'eau remonté.

Dans le bureau n° 1, la pompe semble avoir fonctionné correctement: la consommation est de 10,68 kWh_{ep} par m³ d'eau récupérée.

Dans le bureau n° 2, il y a eu des dysfonctionnements : une fuite dans les cuves de récupération ou une mauvaise régulation de la pompe. La consommation est alors de 21,24 kWh_{ep} par m³ d'eau récupérée. Soit 2 fois plus que dans le bureau n° 1.

Dans le cas du bureau n° 1, la pompe a consommé 1378 kWh_{ef}/an pour remonter sur 8 étages 333 m³ d'eau de pluie, soit 27 % de la consommation totale d'eau du bâtiment.

Illustration 180 - Consommation de pompes de récupération d'eau de pluie



En exploitation, l'économie est certaine, comme le montre le calcul (très simplifié) ci-dessous :

Opération	€ économisé sur l'eau potable	€ dépensé pour la pompe de relevage	Économie annuelle
Bureau n° 1	1 000 €	150 €	850 €

* en prenant 3 €/m³ d'eau potable, et 0,11 €/kWh_{élec} (approximation pour un professionnel entre HC et HP)

À retenir

La consommation de pompe varie en fonction de la hauteur de relevée et se situe aux environs de 5 kWh_{ef}/m³ d'eau récupérée.

5.8 Équipements mobiliers

Sont traitées ici les performances énergétiques des équipements mobiliers tels que la bureautique, l’audiovisuel ou l’électroménager. Ces consommations ne sont pas soumises à la réglementation thermique.

5.8.1 Consommation d’électricité et répartition selon les usages

La consommation de tous les équipements mobiliers a été suivie sur 7 opérations tertiaires et 9 opérations résidentielles. Il s’agit de tous les équipements meubles³⁶ consommant de l’énergie. Leur usage n’entre pas dans le cadre de la réglementation thermique. Il s’agit par exemple :

- des ordinateurs et serveurs dans un immeuble de bureaux ;
- de la machine à laver d’une maison individuelle.

Dans cet échantillon d’opérations, tous ces équipements utilisent de l’électricité (y compris les plaques de cuisson des logements).

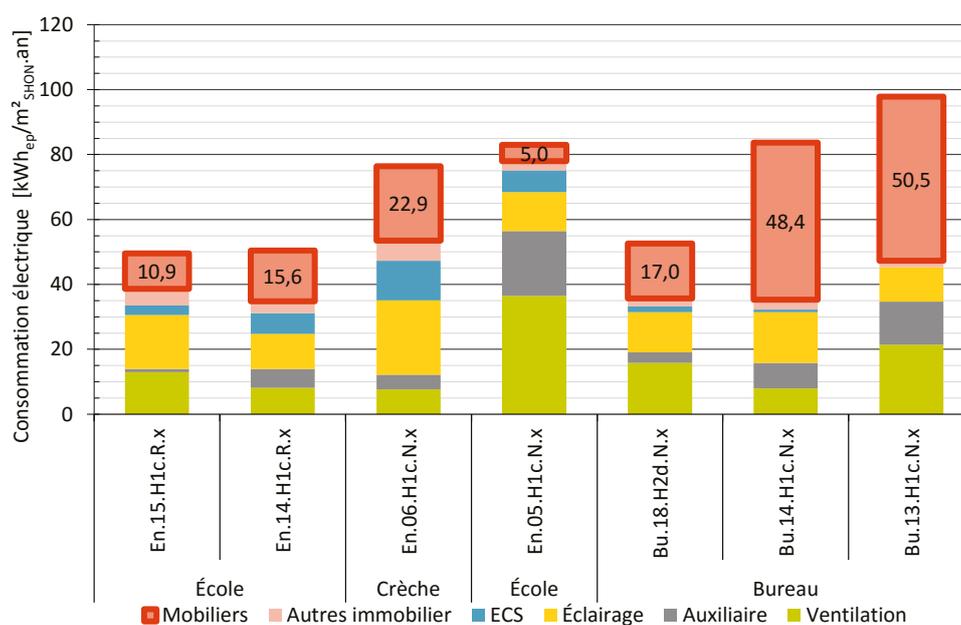
Les équipements mobiliers : les principaux consommateurs d’électricité dans les logements et les bureaux

En dehors de la climatisation ou du chauffage électrique, dans les bureaux, ces consommations peuvent représenter plus de 50 % des consommations électriques totales du bâtiment et plus de 50 kWh_{ep}/m².an. Dans un seul cas, les consommations mesurées sont beaucoup plus faibles, suite à une sensibilisation importante des usagers.

Dans les écoles, ces consommations représentent dans 3 cas sur 4 entre 20 et 30 % des consommations électriques totales, avec plus de 15 kWh_{ep}/m².an dans certains cas. Elles restent cependant bien plus faibles que dans les bâtiments de bureaux.

Que ce soit en école ou en bureaux, le poids de ces postes est très supérieur aux consommations électriques des équipements immobiliers.

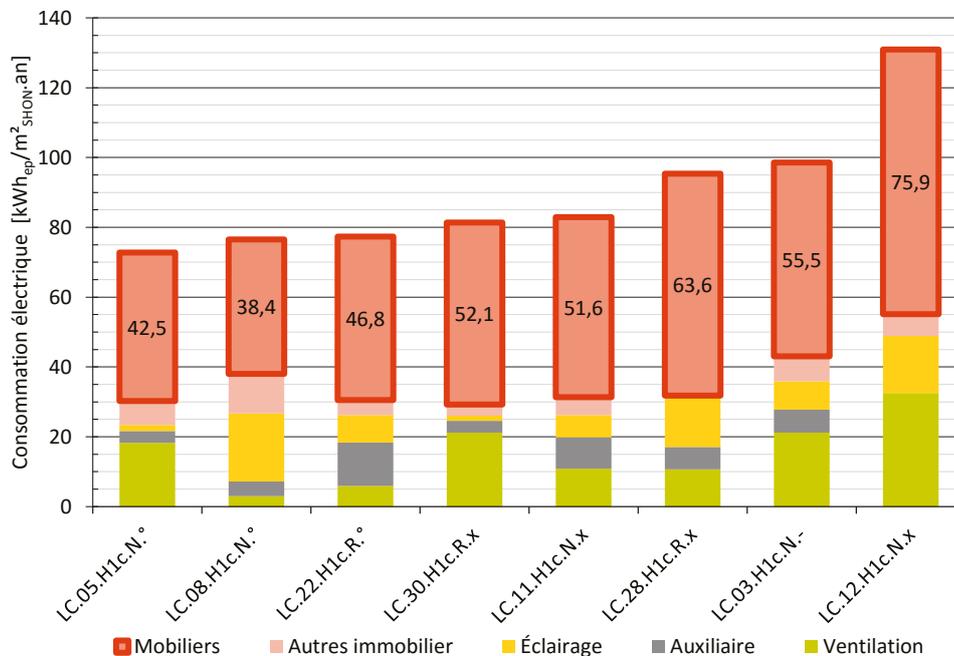
Illustration 181 – Part des équipements mobiliers dans les consommations électriques dans 4 écoles et 3 bureaux



36. Dabs le sens juridique du terme, i.e. qu'on peut déplacer.

En résidentiel, si on exclut le chauffage et l’ECS électrique pour pouvoir comparer les bâtiments entre eux, la consommation des équipements mobiliers représente entre 50 et 80 % des consommations totales d’électricité. Dans 6 cas sur 10, la consommation de ces équipements dépasse 50 kWh_{ep}/m².an.

Illustration 182 – Part des équipements mobiliers dans les consommations électriques en résidentiel

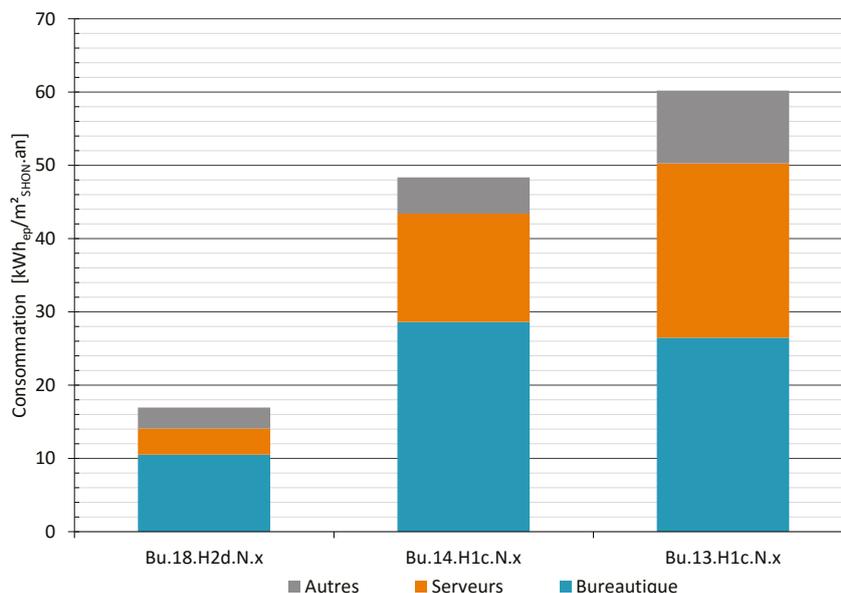


Des enjeux liés aux équipements mobiliers spécifiques à la fonction de bâtiment

Pour les bâtiments de bureaux, les enjeux portent principalement sur la bureautique et les serveurs.

Sur le graphe ci-dessous, il s’agit de deux bâtiments entiers et d’un unique plateau de bureau d’architecte (barre du milieu).

Illustration 183 – Répartition des équipements mobiliers dans les bureaux



Dans 2 cas sur 3, les consommations de bureautique sont supérieures à 25 kWh_{ep}/m².an.

Elles peuvent représenter plus de 50 % des consommations de mobilier.

Les serveurs peuvent également avoir une consommation très élevée, notamment dans le deuxième cas.

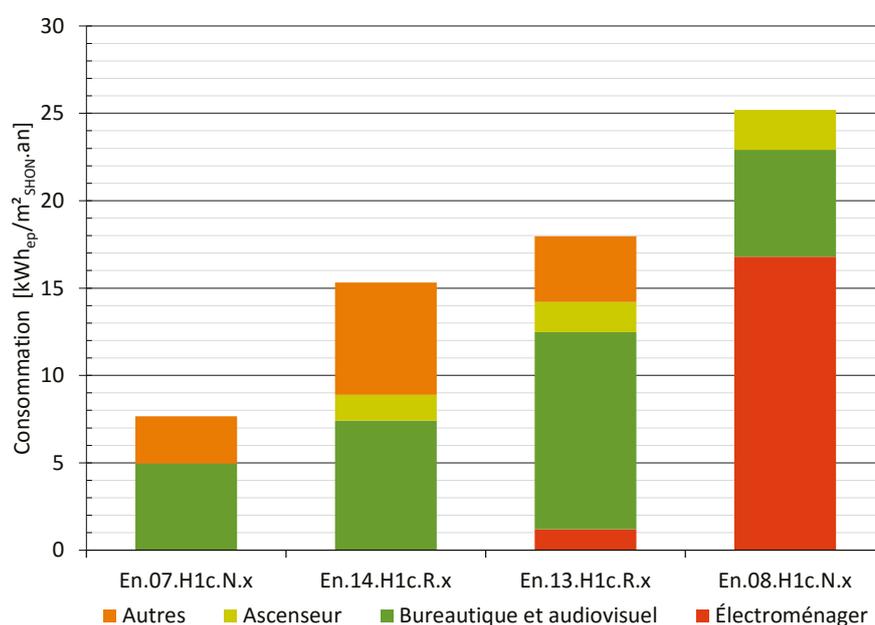
Ces deux postes de consommation seront étudiés en détail dans la suite du chapitre.

Les autres postes de consommation sont surtout des machines à boissons, cafés, cafétéria...

Dans les écoles, la bureautique est également une part principale des consommations électriques non réglementaires, pesant entre 50 et 65 % de ces consommations.

Pour la crèche, l'enjeu est l'électroménager (lave-linge et sèche-linge industriels notamment).

Illustration 184 - Répartition des équipements mobiliers dans les écoles

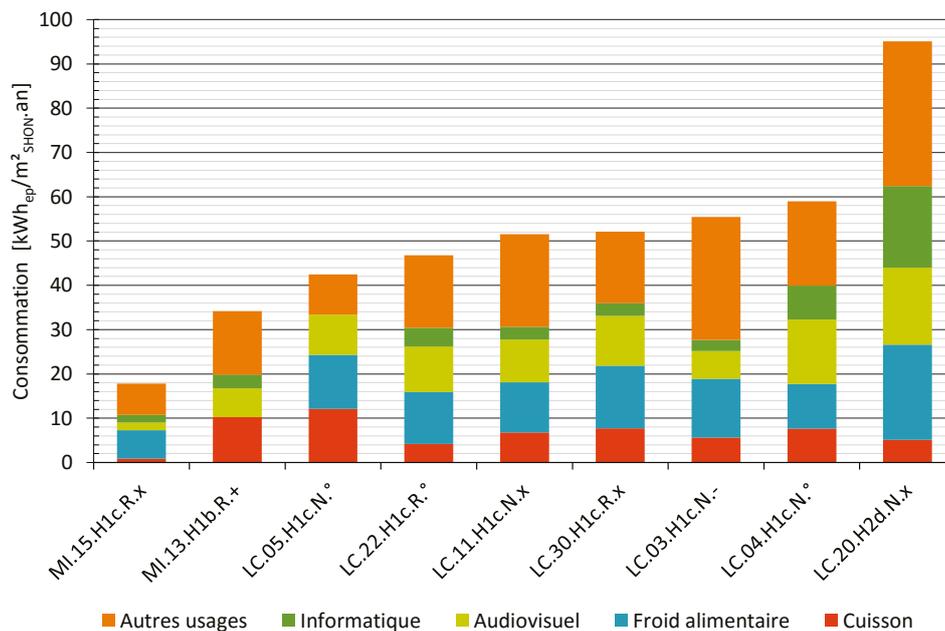


Dans le résidentiel, la consommation des équipements mobiliers des parties privatives est comprise entre 17 et 95 kWh_{ep}/m².an. La moyenne est de 57 kWh_{ep}/m².an.

Les enjeux portent sur le poste « froid alimentaire » (entre 17 % et 36 %), le poste « autres usages » (entre 28 % et 40 %) et le poste « audiovisuel » (entre 10 % et 25 %), qui sont les postes les plus consommateurs des équipements mobiliers.

À noter qu'en complément, le bureau d'études Enertech a effectué un suivi spécifique de ces postes pour le compte de l'Ademe : *Campagne de mesures des appareils de production de froid, des appareils de lavage et de la climatisation*, juin 2016.

Illustration 185 – Répartition des équipements mobiliers dans le résidentiel



À retenir

La consommation des équipements mobiliers représente une part prépondérante des consommations électriques, quel que soit l'usage du bâtiment.

Dans les bureaux, sauf exception, la consommation se situe autour de 50 kWh_{ep}/m².an. Elle est surtout due à la bureautique et aux serveurs.

Dans les écoles, les consommations varient entre 5 et 15 kWh_{ep}/m².an. Elles sont surtout causées par la bureautique.

Dans le résidentiel, la consommation est en moyenne de 57 kWh_{ep}/m².an. Les principaux enjeux seront le froid alimentaire et l'audiovisuel.



Dans la suite de ce chapitre, les consommations pourront être exprimées en énergie finale (kWh_{ef}), en plus de celles qui resteront en énergie primaire (kWh_{ep}).

5.8.2 Zoom sur la bureautique dans le tertiaire

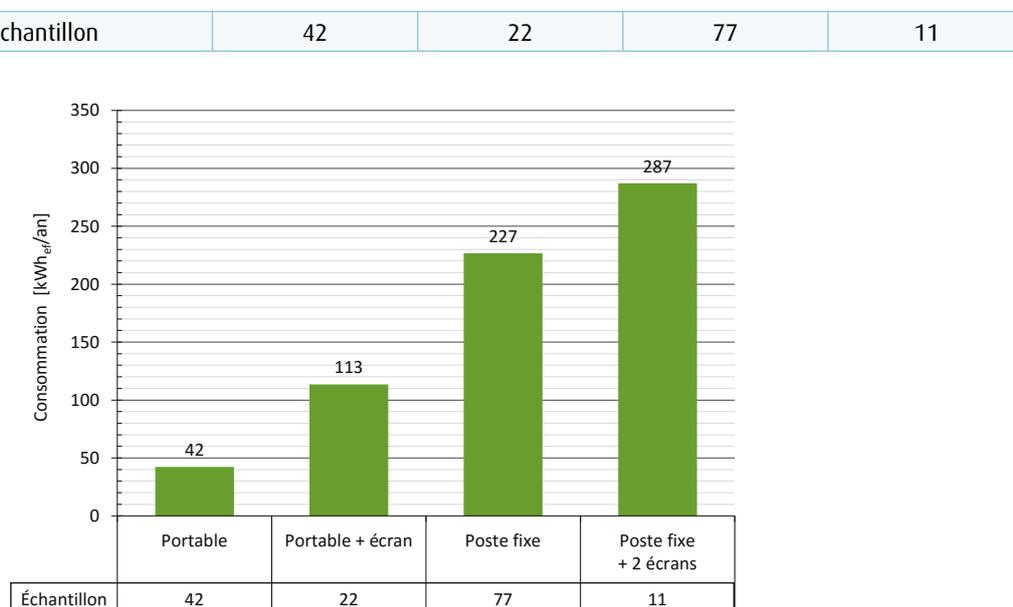
Parmi toutes les campagnes de mesures, de nombreux ordinateurs ont été suivis dans les bâtiments de bureaux. Des moyennes ont été faites par type :

- ordinateur portable sans écran supplémentaire ;
- ordinateur portable avec un écran ;
- ordinateur fixe avec un écran ;
- ordinateur fixe avec deux écrans.

Point de vigilance : les années de livraison des bâtiments sont connues (entre 2006 et 2010 pour la plupart). Mais l'âge des équipements informatiques ne l'est pas. Les bâtiments étant occupés par des services ayant déménagé, ces équipements peuvent être plus anciens dans certains cas.

Sur le graphe ci-dessous (en énergie finale), les consommations moyennes sont données. Moyenne sur le nombre de postes total de l'échantillon (chiffre en bleu au-dessus).

Illustration 186 – Consommation de trois configurations d'ordinateur en moyenne par opération



Les ordinateurs portables consomment en moyenne par année 5,4 fois moins que les postes fixes.

La consommation reste divisée par 2 pour un ordinateur portable équipé d'un écran supplémentaire.

Il faut rester vigilant sur le temps de fonctionnement des ordinateurs portables, notamment sur le réglage de la veille automatique.



Sur l'échantillon, certains ordinateurs portables ont une forte consommation, liée soit à une mise en veille automatique désactivée, soit à un appareil de forte puissance non adapté.

À retenir

En moyenne, un ordinateur portable a une consommation de 42 kWh_{ef}/an, 5 fois moindre qu'un ordinateur fixe (227 kWh_{ef}/an).

Un ordinateur portable avec écran aura une consommation 2,7 fois plus élevée qu'un ordinateur portable seul (113 kWh_{ef}/an).

Au-delà de la maîtrise de la durée de fonctionnement par rapport à la durée d'utilisation réelle, quelques économies sont réalisables en agissant sur les réglages des systèmes de veille ou la programmation de l'alimentation.

Sur une opération :

« On arrive à une économie de 25 % des consommations de bureautique entre les deux premières années de suivi, sans aucun investissement matériel, simplement en réglant la veille des photocopieurs, la veille des ordinateurs et en coupant systématiquement les barrettes multiprises. »

5.8.3 Zoom sur les serveurs bureautiques en tertiaire

Rappel: les serveurs peuvent peser jusqu'à 25 kWh_{ep}/m².an et 40 % des consommations électriques de mobiliers.

Sur toutes les opérations suivies, les serveurs ont un fonctionnement permanent excepté dans un cas.

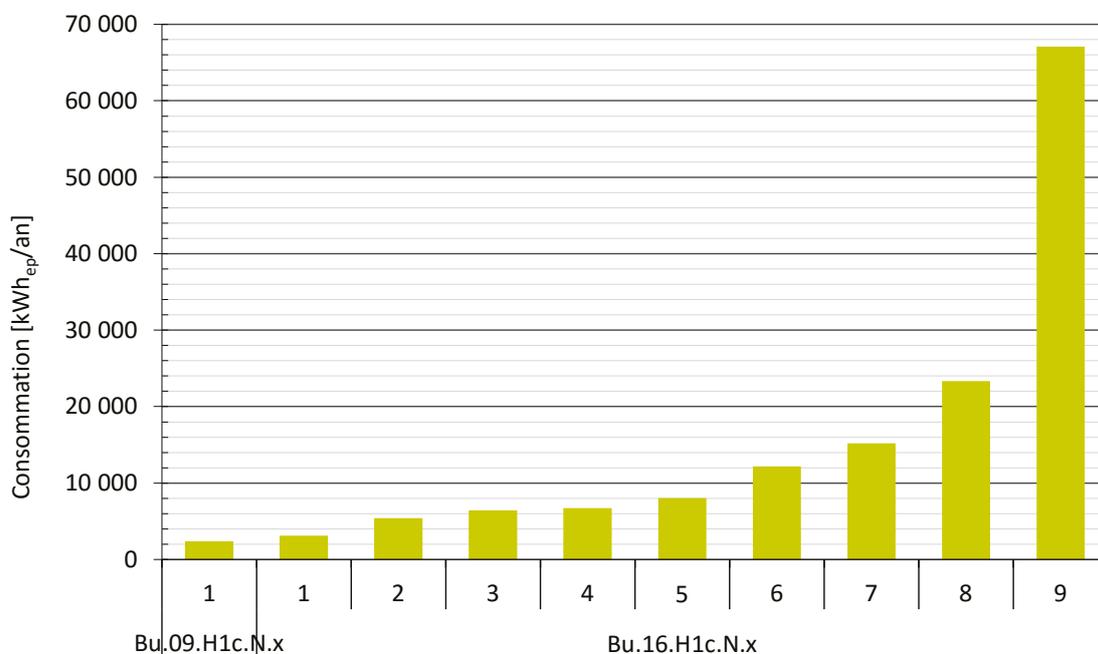
Un fonctionnement permanent et des consommations élevées

Le graphe ci-dessous reprend les puissances et consommations de serveurs installés sur des plateaux de bureaux. Les serveurs mutualisés pour l'ensemble du bâtiment sont écartés ici.

Pour les plateaux, la consommation des serveurs varie de 2 400 kWh_{ep}/an à 23 344 kWh_{ep}/an. Cette consommation est directement liée à la puissance installée.

Un des serveurs a une consommation de 67 080 kWh_{ep}/an. Il n'est pas uniquement lié aux occupants du plateau. Il s'agit d'un serveur d'une coopérative financière.

Illustration 187 – Consommation de serveurs sur des plateaux de bureau



Sur un des plateaux, le serveur est coupé la nuit. Il s'éteint automatiquement à une heure du matin, suite à l'enregistrement, et les premiers arrivés le lendemain matin rallument le serveur, en appuyant simplement sur un bouton.

Cette action a permis d'économiser 1 500 kWh_{ep}/an sur le serveur, soit 7 % des consommations totales d'électricité du plateau.

Une telle organisation est-elle reproductible pour des structures de non-initiés, ou pour des structures plus grosses ?

Cela semble compliqué, comme pour l'utilisation de n'importe quel autre dispositif de coupure en inoccupation. Une analyse est effectuée dans la suite du document (§ 5.8.6).

Des consommations moyennes plus faibles pour les cas de serveurs mutualisés suivis

Dans les bâtiments de bureaux, lorsque les serveurs sont mutualisés, leur consommation varie entre 11 et 16 kWh_{ep}/m²SU.an.

Lorsqu'ils ne sont pas mutualisés, la consommation totale des serveurs est parfois équivalente. Mais elle est parfois très supérieure, atteignant 45 kWh_{ep}/m²SU.an.

Si ces différences de consommation se confirmaient, on pourrait les expliquer de la manière suivante :

- lorsque les serveurs sont mutualisés, il y a plus fréquemment un spécialiste pour l'installation, en capacité d'optimiser leur fonctionnement ;
- lorsque les serveurs sont séparés, les organisations gèrent plus souvent leur installation et leur fonctionnement en interne. Ces services n'étant que rarement spécialistes du sujet, le fonctionnement des serveurs n'est donc pas toujours optimisé.

Dimensionnement de l'onduleur

Les serveurs sont toujours branchés sur un onduleur permettant l'alimentation en électricité en cas de coupure de courant. L'onduleur montre des pertes conséquentes sur toutes les opérations où il a été suivi.

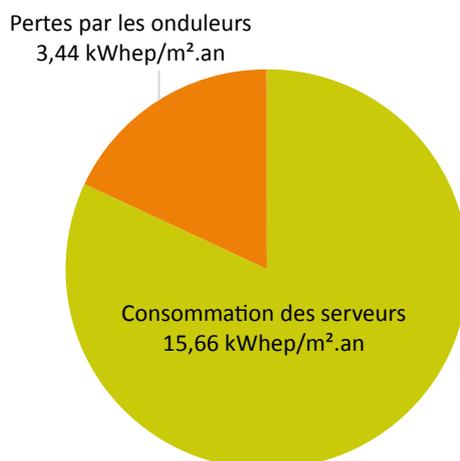
Ces pertes sont surtout dues à un surdimensionnement de l'onduleur. Un onduleur ayant un taux de charge élevé a peu de pertes. À l'inverse, s'il a un taux de charge faible les pertes seront élevées.

Sur une opération :

« Les pertes de l'onduleur représentent 18 % de la consommation totale du serveur.

« Ceci peut être dû à un onduleur surdimensionné (9 kW) par rapport au serveur (2,4 kW). »

Illustration 188 – Dimensionnement de l'onduleur



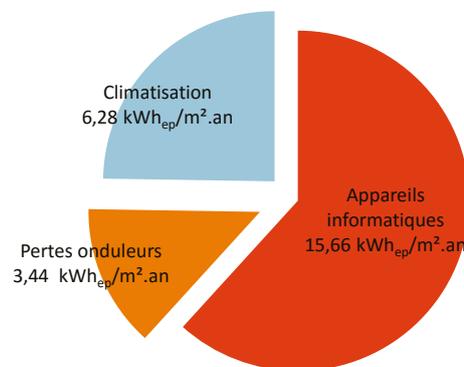
Climatisation de la salle des serveurs

Sur trois opérations dont les données sont disponibles, la climatisation de la salle des serveurs a fait l'objet d'un mode de pilotage différent :

- opération 1: le local est climatisé entre 15 et 20 °C en permanence ; la consommation de la climatisation spécifique est de 6,28 kWh_{ep}/m².an, soit 25 % de la consommation totale « serveur + climatisation » ;
- opération 2: le choix a été fait de ne pas climatiser le local du serveur, compte tenu de la faible taille du serveur ; la température de la salle est montée à 29,5 °C sans créer aucun dysfonctionnement sur les appareils ;
- opération 3: la température de consigne était réglée à 20 °C ; elle a été remontée à 22 °C, température encore acceptable.

Sur une opération :

« Ont été mesurées la consommation du serveur, de la climatisation, et les pertes de l'onduleur.



Dans ce cas il est possible de calculer le PUE, l'indicateur d'efficacité énergétique

$$PUE = \frac{\text{consommation totale}}{\text{consommation informatique}} = 1,56$$

Plus cet indicateur est faible, plus l'efficacité de l'installation est élevée.

Pour comparaison, les meilleurs PUE sont de l'ordre de 1,2 dans les data center³⁷. »

À retenir

La consommation des salles de serveurs est très élevée à cause :

- d'une puissance de fonctionnement élevée ;
- d'un fonctionnement permanent ;
- des pertes de l'onduleur ;
- d'une climatisation dédiée maintenant le local à basse température.

Des économies peuvent être faites en mettant en place une organisation spécifique autour du serveur, permettant de le couper en inoccupation, et de passer par des personnes qualifiées pour l'installer.

37. Indicateur utilisé par les acteurs de l'informatique pour qualifier la performance des *data centers*. Sa définition a été développée par le consortium The Green Grid.

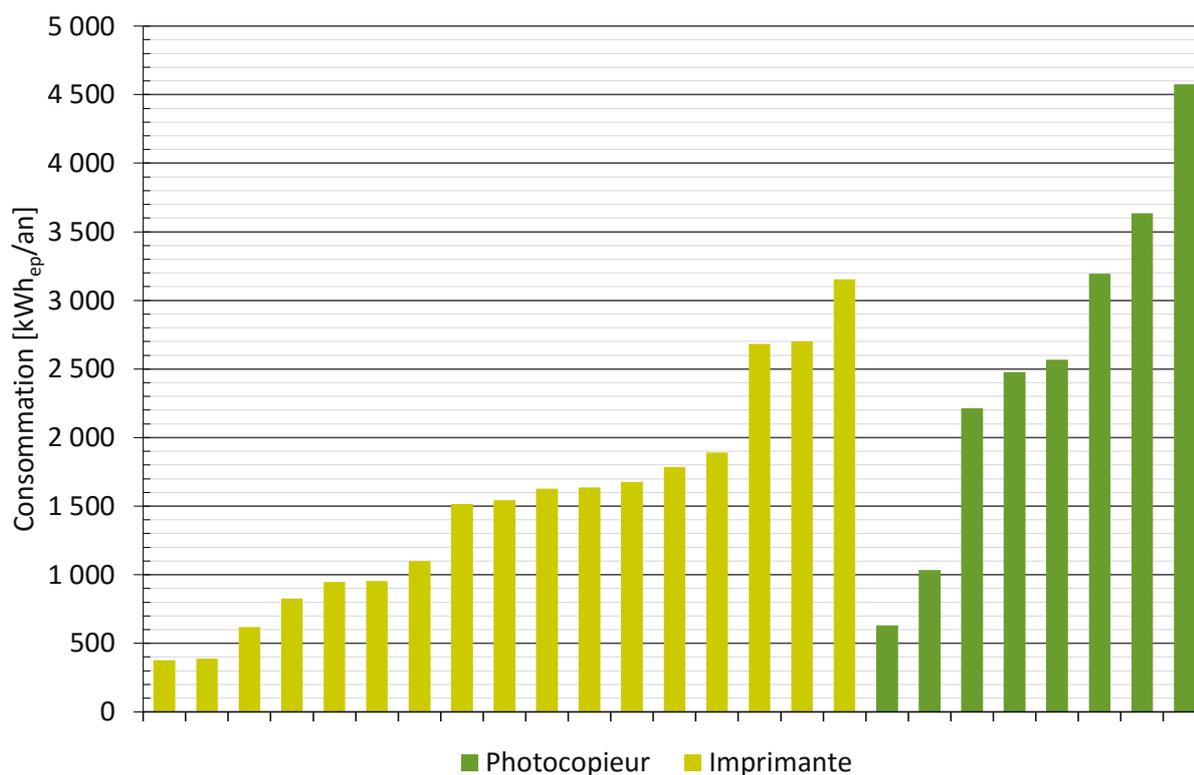
5.8.4 Zoom sur les autres équipements bureautiques en tertiaire

Sans surprise, la consommation des gros photocopieurs est supérieure à la consommation des imprimantes.

Cependant la gestion des veilles de ces appareils fait que certaines imprimantes ont une consommation supérieure à celle de certains photocopieurs.

Ainsi les imprimantes ont une consommation comprise entre 146 et 1222 kWh_{ep}/an, alors que celle des photocopieurs varie entre 400 et 1773 kWh_{ep}/an.

Illustration 189 – Consommation des imprimantes et des photocopieurs



Point de vigilance: les années de livraison des bâtiments sont connues (entre 2006 et 2010 pour la plupart). Mais l'âge des équipements informatiques ne l'est pas. Les bâtiments étant occupés par des services ayant déménagé, ces équipements peuvent être plus anciens.

La mise en veille et les prises programmables

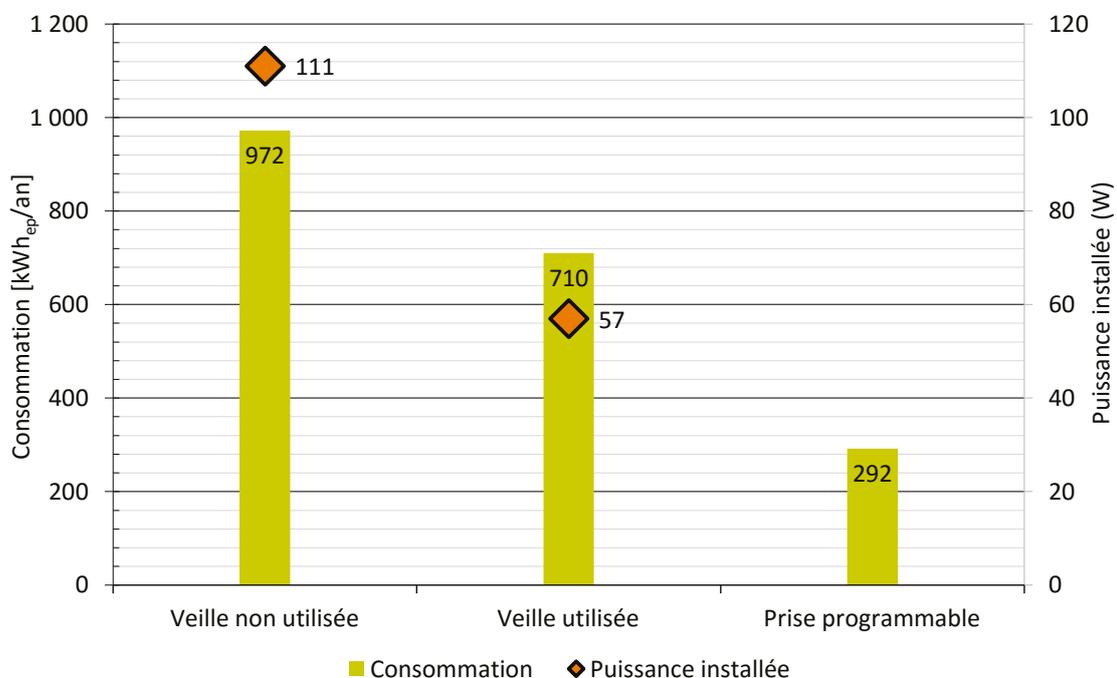
Les consommations des imprimantes et des photocopieurs sont prépondérantes en inoccupation. Mais la mise en veille est-elle la meilleure solution ?

Suivant les caractéristiques de chaque imprimante, et de ses fonctionnalités disponibles, il peut exister une meilleure solution.

Par exemple, sur deux imprimantes différentes suivies, il s'avère que les consommations de veille restent élevées, respectivement 50 et 120 W.

La mise en place de prises programmables est alors plus efficace, comme le montre le **graphe ci-dessous, représentant la puissance et la consommation d'une même imprimante avec différentes configurations**. Les puissances sont mesurées, les consommations annuelles sont estimées à l'aide des heures d'occupation.

Illustration 190 - Puissance de veille et consommation annuelle d'une imprimante dans 3 configurations différentes



Dans ce cas, avec une mise en veille, la consommation est divisée par 1,4. Avec une prise programmable elle est divisée par 3,3.

Sur un bâtiment :

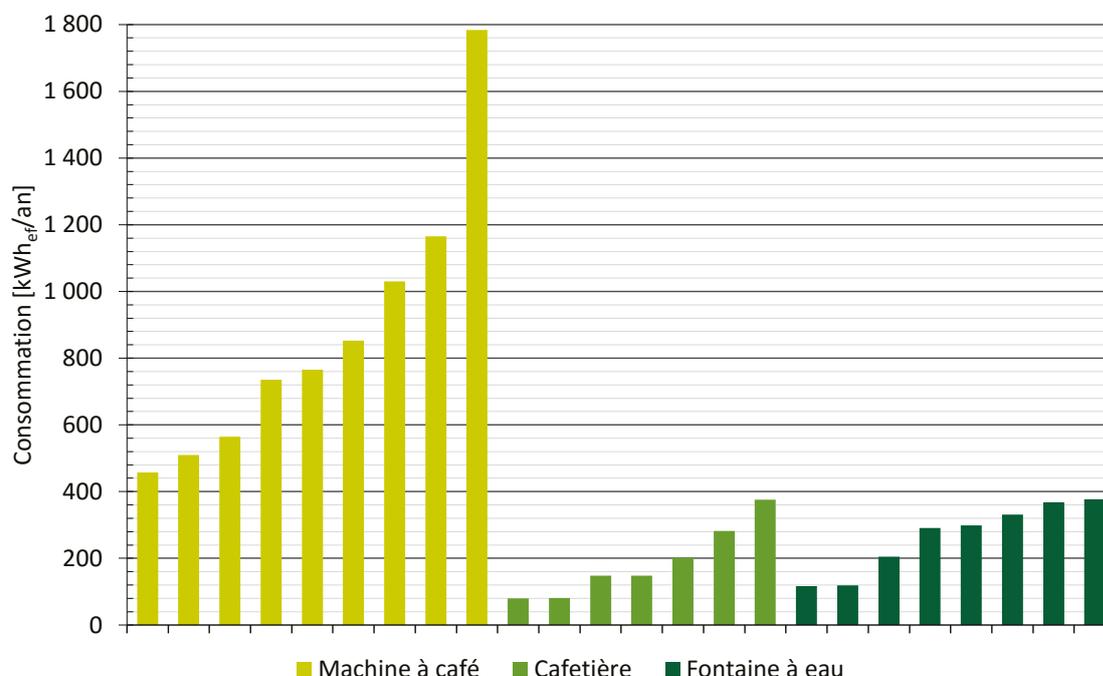
« Sur un bâtiment entier de 8 916 m² SHON, si toutes les imprimantes (13) et photocopieurs (4) sont mis en veille la nuit, le gain est estimé à 1,3 kWh_{ep}/m².an (soit 11 591 kWh_{ep}/an).

S'ils sont tous coupés, le gain est estimé à 3,4 kWh_{ep}/m².an (soit 30 314 kWh_{ep}/an). »

5.8.5 Zoom sur les autres équipements mobiliers en tertiaire

Sur certaines opérations, des machines à boissons ont été instrumentées et suivies. L'illustration 191 en rapporte les consommations mesurées, en énergie finale.

Illustration 191 – Consommation mesurée de distributeurs de café, cafetières, et fontaines à eau



Les distributeurs de café ont une consommation très élevée, allant de 500 à 1800 kWh_{ef}/machine.an. La consommation est variable selon la taille de la machine.

À noter que la machine la plus consommatrice est munie d'une prise programmable la coupant toutes les nuits. Mais elle est vraiment de taille plus importante que les autres.

Les cafetières consomment bien moins, toujours moins de 400 kWh_{ef}/machine.an.

Les fontaines à eau ont également une consommation variable en fonction de leur gestion.

Ces chiffres sont à prendre avec recul. Les grosses machines à café et les cafetières ne concernent pas le même nombre d'utilisateurs. Il n'est pas possible ici de connaître la consommation par nombre d'utilisateurs, ce qui pourrait montrer des résultats différents.

À retenir

Un distributeur de café a une consommation de l'ordre de 800 kWh_{ef}/an, similaire à celle de 3,5 ordinateurs fixes ou 19 ordinateurs portables.

Cette consommation peut monter à 1800 kWh_{ef}/an, équivalente à celle de 8 ordinateurs fixes ou 43 ordinateurs portables.

5.8.6 Utilisation des prises programmables et clés de coupures en tertiaire

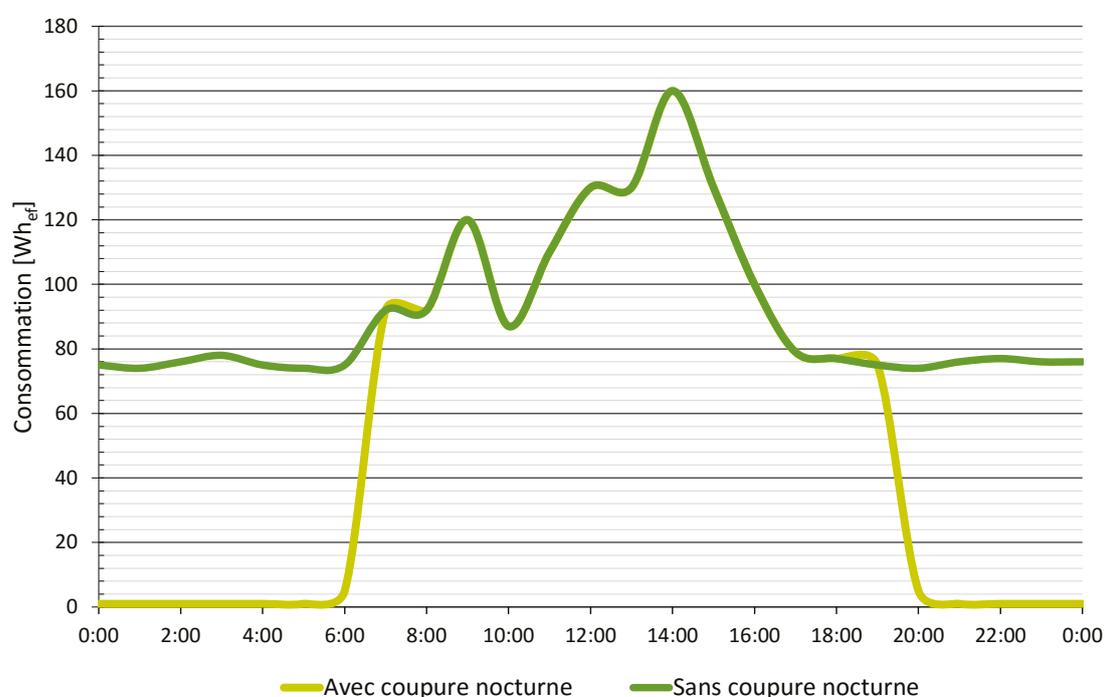
Dans certaines opérations ont été installés des dispositifs pour réduire les consommations électriques en inoccupation :

- des prises programmables sur des appareils particuliers ;
- des clés de coupure sur les plateaux de bureaux.

Le cas des prises programmables

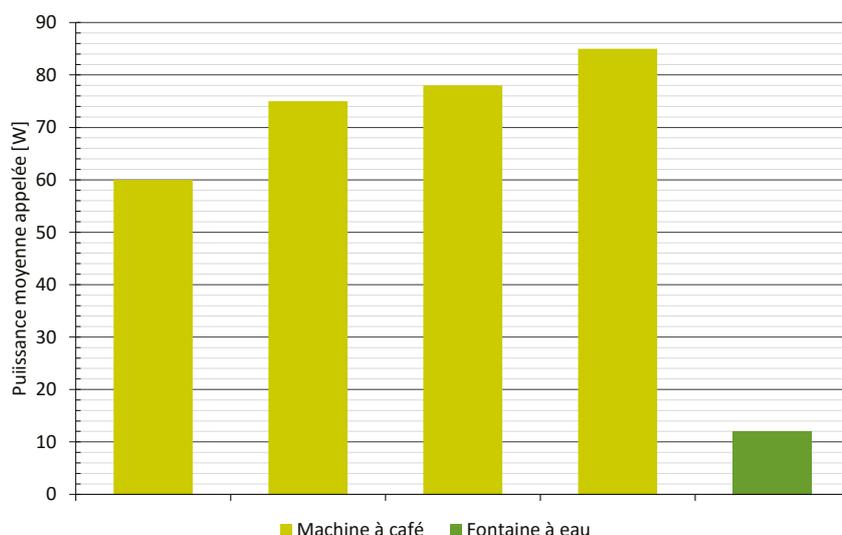
Sur certains appareils mesurés, des prises programmables sont installées. Ces prises coupent les équipements reliés selon des horaires programmés (nuits et week-ends), ce qui permet d'effacer les consommations en inoccupation, de fonctionnement ou de veille. Comme le montre le graphe ci-après, une machine à café présente un appel de puissance de 0 W la nuit au lieu de presque 78 W.

Illustration 192 – Effet d'une prise programmable (source Etamine)



Dans certains bâtiments de l'échantillon, les puissances de veille de différents distributeurs de café et d'une machine à eau ont été mesurées.

Illustration 193 – Puissance moyenne appelée sur l'année de différents équipements

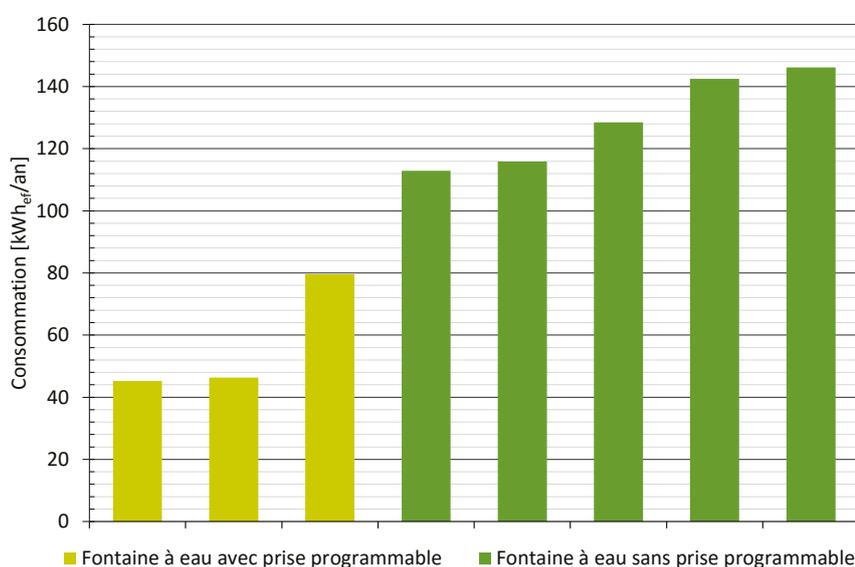


La mise en place d'une prise programmable permettra d'effacer presque 80 W pour toutes les machines à café, pendant de longues heures, et autour de 12 W pour les machines à eau.

Les résultats sur les consommations sont visibles. Ci-dessous l'illustration 194 montre les consommations annuelles de 8 fontaines à eau distinctes. 3 d'entre elles sont équipées d'une prise programmable, les autres non.

Les consommations associées sont divisées par un facteur 1,5 à 3.

Illustration 194 – Consommation de fontaines à eau avec prises programmables (vert) et sans prises programmables (orange)



Dans l'échantillon, peu d'appareils sont équipés de prises programmables, alors qu'elles sont peu onéreuses et simples à mettre en place. Pourquoi? Des pistes sont évoquées à la fin de ce chapitre.

À retenir

L'efficacité des prises programmables est démontrée, avec des réductions des consommations d'un facteur 1,5 à 3. Elles sont faciles à mettre en place et peu onéreuses. Pourtant peu d'appareils en sont équipés.

Le cas des clés de coupure au niveau de chaque plateau de bureaux

Dans certains bâtiments de bureaux, un interrupteur permet de couper toutes les prises électriques d'un plateau.

Sur un bâtiment de bureaux en Rhône-Alpes :

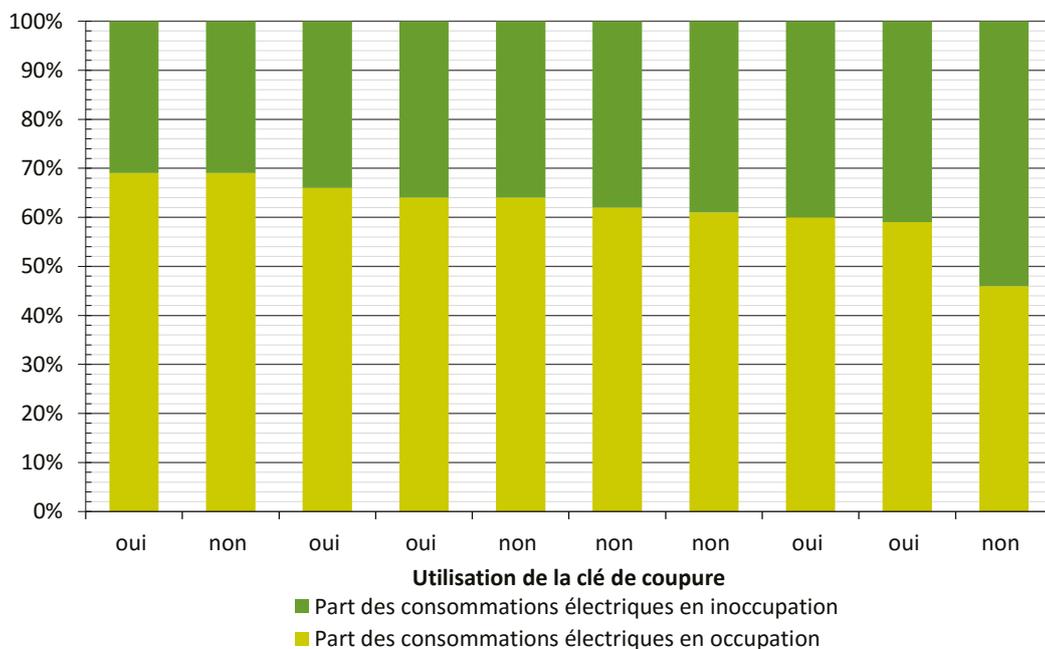
« Cet interrupteur est très peu utilisé (sur un seul plateau sur 16). Soit par méconnaissance, soit parce que des appareils type frigo sont branchés sur ces prises.
De plus il a été constaté que les nouveaux arrivants n'étaient pas informés de l'existence d'une clé de coupure. »

Dans un autre immeuble de bureaux, l'interrupteur est davantage utilisé. Seuls les serveurs sont sur des prises différentes, pour ne pas être coupés.

L'illustration 195 montre la part des consommations électriques en occupation et inoccupation, selon que l'interrupteur de coupure générale est fermé ou non.

Les plateaux n'ayant pas ou n'intégrant pas les consommations de serveurs ont été enlevés du graphique.

Illustration 195 – Part des consommations en occupation et inoccupation selon que la clé de coupure est utilisée ou non



Le gain n'est pas visible sur le graphe. Il n'y a pas de corrélation entre la part de la consommation électrique en inoccupation et l'utilisation ou non de la clé de coupure.

Forcément il y aura un gain sur tous les appareils de bureautique si l'interrupteur est installé. Mais la puissance serveur installée reste prédominante dans les consommations en inoccupation.

À retenir

Dans notre échantillon, l'efficacité des clés de coupure n'a pas été démontrée lorsqu'elles sont installées.
Les consommations en inoccupation ne sont pas forcément plus faibles lorsqu'elles sont utilisées.

Les dispositifs d'arrêt automatique en inoccupation. Les points de blocage



Installer des prises programmables sur des équipements particuliers semble simple. Tourner une clé de coupure automatique en partant le soir paraît également simple.

Pourtant il a été montré que ces dispositifs sont rarement installés, et rarement utilisés. Pourquoi ?

Dans une organisation, plus il y a de personnes concernées, moins chacun se permet d'intervenir hors de ses prérogatives. Ainsi, l'utilisation de ces dispositifs devrait être à l'initiative du manager.

Or un manager n'est que peu concerné par le coût énergétique de ces machines, bien faible par rapport au coût des salariés et à leur rentabilité. L'objectif sur le lieu de travail est d'avoir un espace consensuel, en évitant toute source de tension.

En dehors du responsable du plateau, qui serait apte à utiliser ce dispositif ? La personne partant la dernière le soir et celle arrivant la première le matin sont rarement les mêmes d'un jour à l'autre. Et celui qui se permet d'utiliser ces dispositifs prend le risque de s'exposer à ses collègues. Et de se désengager dès la première remarque désobligeante. **La personne chargée d'éviter le « gaspillage électrique » doit donc être légitime dans le domaine.**

Pour conclure, il semble essentiel de commencer par casser tous les fantasmes liés à l'arrêt automatique. Une coupure volontaire n'est pas synonyme de perte de données, de perte de temps, ou de pannes à répétition.

À retenir

Dans une organisation de non-initiés, couper automatiquement les consommations de veille en inoccupation est faisable, mais compliqué.

La mise en place de cette disposition passera par trois actions préalables :

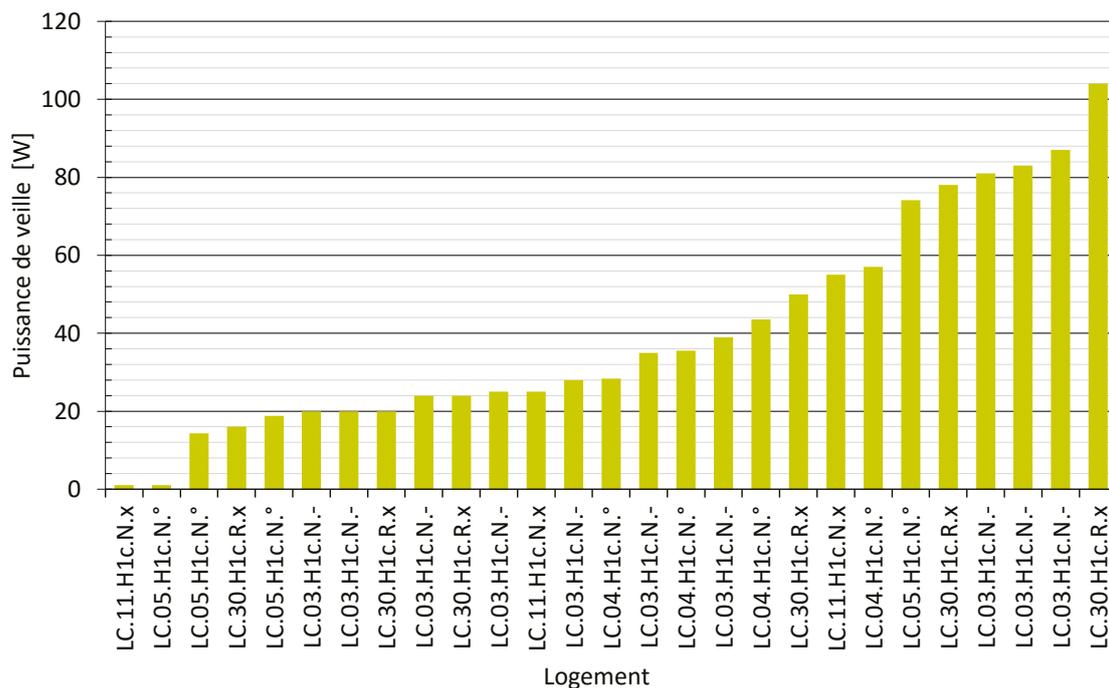
- intéresser les responsables pour que ces sujets les concernent ;
- éduquer les usagers pour écarter toutes les peurs liées à l'arrêt automatique ;
- désigner clairement une personne responsable du bon fonctionnement et de l'utilisation de ces dispositifs.

5.8.7 La puissance de veille en logements

Les mesures ont montré que l’audiovisuel est à l’origine d’une part importante des consommations électriques en logements (entre 10 % et 25 %), en raison notamment d’une puissance de veille importante.

La puissance de veille d’un logement a été définie comme la puissance de tous les appareils électriques (hors poste « froid alimentaire ») la plus souvent observée entre 3 h et 4 h³⁸ du matin. Elle a pu être déterminée pour 27 logements répartis sur 5 opérations de logements collectifs. Le graphique ci-dessous représente les puissances de veille ainsi relevées.

Illustration 196 – Puissance de veille mesurée sur 27 logements



Elle est très variable (de 0 à plus de 100 W par logement) et dépend de la qualité et de la gestion des équipements par les occupants.



Pour certaines de ces opérations, un dispositif permettant de couper l’alimentation des prises électriques du salon par un interrupteur (prises de courant commandées) a été installé. Lorsqu’il est utilisé par les occupants, ce type d’appareil permet de couper la consommation de veille des équipements audiovisuels.

L’utilisation des dispositifs coupe-veille dans les logements

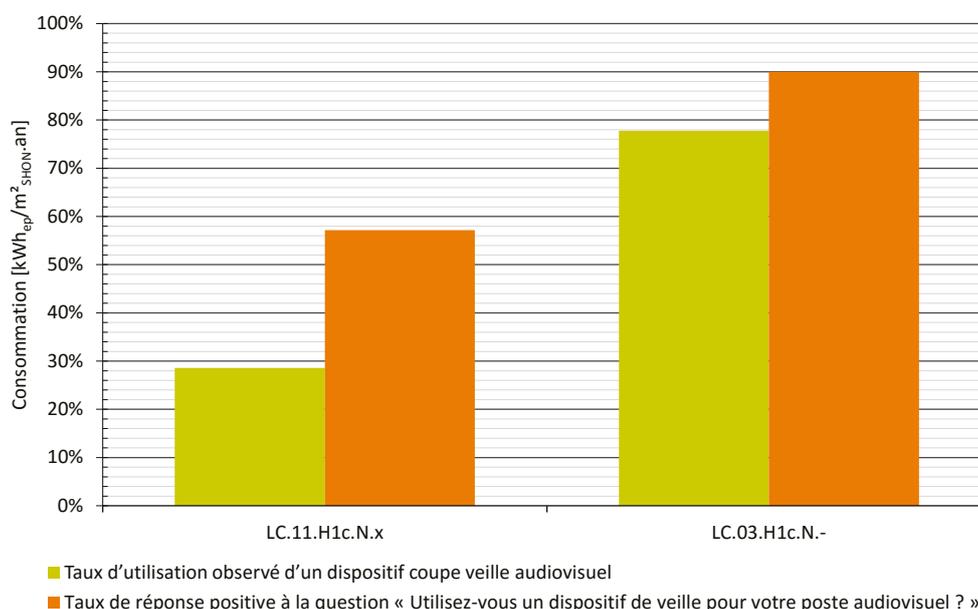
Pour deux de ces opérations, des données sont disponibles pour comparer l’impact de la présence de ce dispositif sur la consommation de veille des logements.

Des enquêtes menées auprès des occupants de ces deux opérations vont permettre de caractériser le niveau d’information selon l’opération. Tous les occupants interrogés déclaraient connaître l’existence du dispositif dans leur logement. Cependant, à la question « utilisez-vous un dispositif de coupure de veille sur votre poste audiovisuel ? » (sous-entendu le dispositif en place ou un autre), le taux de réponses positives varie selon l’opération.

38. Heures à laquelle, il y a le plus de chance que les occupants soient inactifs.



Illustration 197 – Utilisation d'un dispositif coupe-veille dans les logements



On observe³⁹ qu'une forte majorité (78 %) des foyers interrogés dans l'opération LC.03.H1c.N.- utilisent effectivement un dispositif coupe-veille, alors que seulement 29 % des personnes interrogées de l'opération LC.11.H1c.N.x l'utilisent; mesures confirmées par le taux de réponse à la question posée aux occupants sur l'utilisation d'un dispositif coupe-veille.

Ces écarts d'utilisation se traduisent sur les niveaux de consommation de veille d'audiovisuel des logements

Pour ces deux opérations, la consommation de veille a été mesurée. Également, l'économie d'énergie réalisée grâce au dispositif coupe-veille a été estimée (cette estimation se base sur le calcul de la consommation de veille d'audiovisuel de chaque logement dans le cas où le dispositif coupe-veille n'est jamais utilisé; cette valeur correspond aux économies réalisables; la différence entre cette valeur théorique et la consommation mesurée représente l'économie d'énergie réalisée).

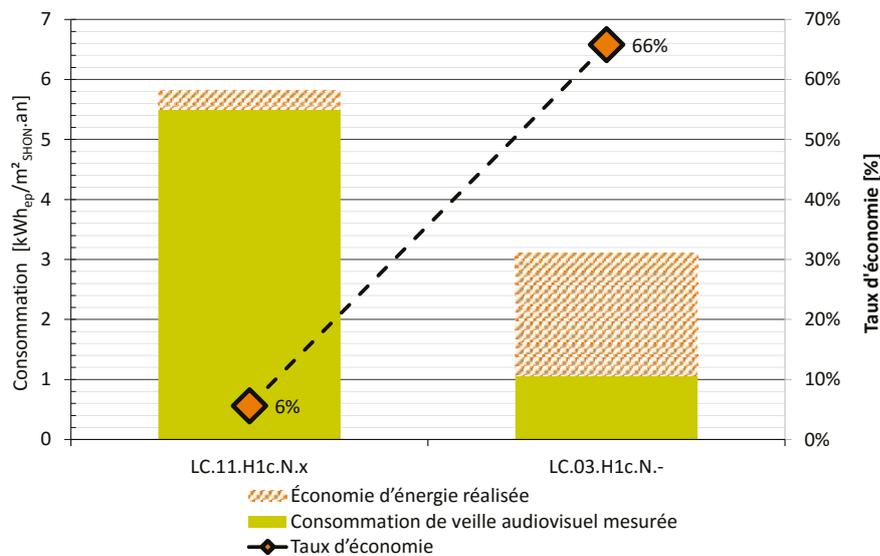
Ces données sont présentées sur le graphique ci-après. Pour comparer les deux opérations, on confronte le taux d'économie qui traduit la part d'économie réalisée par rapport aux économies réalisables.

Les logements suivis dans l'opération LC.03.H1c.N.- ont alors un taux d'économie bien plus élevé que l'opération LC.11.H1c.N.x (66 % contre 6 %). Cela indique bien que les dispositifs coupe-veille ont été plus souvent utilisés dans l'opération LC.03.H1c.N.- et ont permis de réaliser des économies d'énergie plus importantes.

39. L'analyse de l'évolution horaire des courbes de charge du poste « audiovisuel » permet d'observer si un dispositif coupe-veille est réellement utilisé.



Illustration 198 – Économie d'énergie estimée d'un dispositif coupe-veille d'audiovisuel



Des explications sociologiques pour comprendre des comportements différents

La qualité du message passé et l'accompagnement proposé aux occupants sur l'utilisation de ces dispositifs peuvent être différents d'une opération à l'autre.

La sensibilité au message sur la réduction de la consommation d'énergie peut également varier selon la catégorie sociale du public rencontré. Cela peut être le cas ici puisque l'opération LC.03.H1c.N.- a été construite par un promoteur immobilier et l'opération LC.11.H1c.N.x par un bailleur social.

Cette différence d'utilisation pourrait tout simplement s'expliquer par des raisons liées à « l'ergonomie » du dispositif. Les occupants sont plus enclins à l'utiliser s'il se situe à côté des interrupteurs d'éclairage que s'il se situe à un endroit plus encombré, derrière un meuble de télévision par exemple. Il faut également veiller à ce que la fonction de l'interrupteur soit clairement identifiable pour qu'il ne soit pas confondu avec un interrupteur d'éclairage.

Les règles d'utilisation de ces dispositifs varient aussi suivant la composition du foyer. Par exemple, au sein d'une cellule familiale, la réduction des consommations d'énergie n'est pas une fin en soi. Si éteindre l'audiovisuel cristallise un ensemble de tensions, les exigences seront plus facilement revues à la baisse sur ce sujet que sur un autre. Néanmoins, la composition des logements devrait avoir un impact ici réduit. Les deux échantillons étudiés ici semblent assez proches de ce point de vue⁴⁰.

À retenir

La veille des équipements d'un logement peut atteindre une puissance de 100 W.

La mise en place de prises de courant commandées ne garantit pas un effacement des consommations de veille du poste de consommation affecté par le dispositif.

L'utilisation de ce type de dispositif dépend :

- de la qualité du message et de l'accompagnement proposé avec sa mise à disposition ;
- de sa « facilité » d'accès (à proximité des interrupteurs d'éclairage par exemple) ;
- des règles de vie et des jeux de pouvoir existant au sein des foyers, reléguant souvent le sujet de l'économie d'énergie.

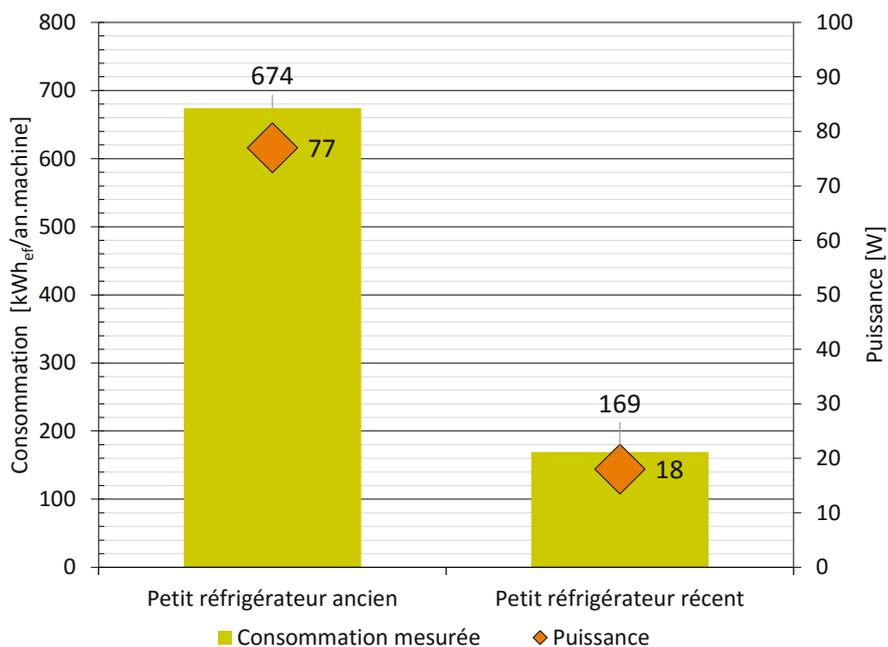
40. Les logements ont une surface moyenne voisine (70 m² pour l'opération 1217 et 70 m² pour la 1204), un nombre d'occupants moyen équivalent (2,7 personnes pour la 1217 et 2,5 personnes pour la 1204) et une démographie similaire (52 % des occupants ont entre 18 ans et 60 ans pour la 1217, 66 % pour la 1204).

5.8.8 L'électroménager : des équipements anciens très consommateurs

Sur deux opérations différentes, deux petits réfrigérateurs de même contenance ont été suivis. L'un des deux est ancien, l'autre est récent.

Aussi bien sur la puissance appelée que sur la consommation annuelle, on observe un écart d'un facteur 4. Le réfrigérateur récent consomme 169 kWh_{ef}/an, alors que la consommation de l'ancien est de 674 kWh_{ef}/an.

Illustration 199 – Consommation de deux réfrigérateurs d'âges différents



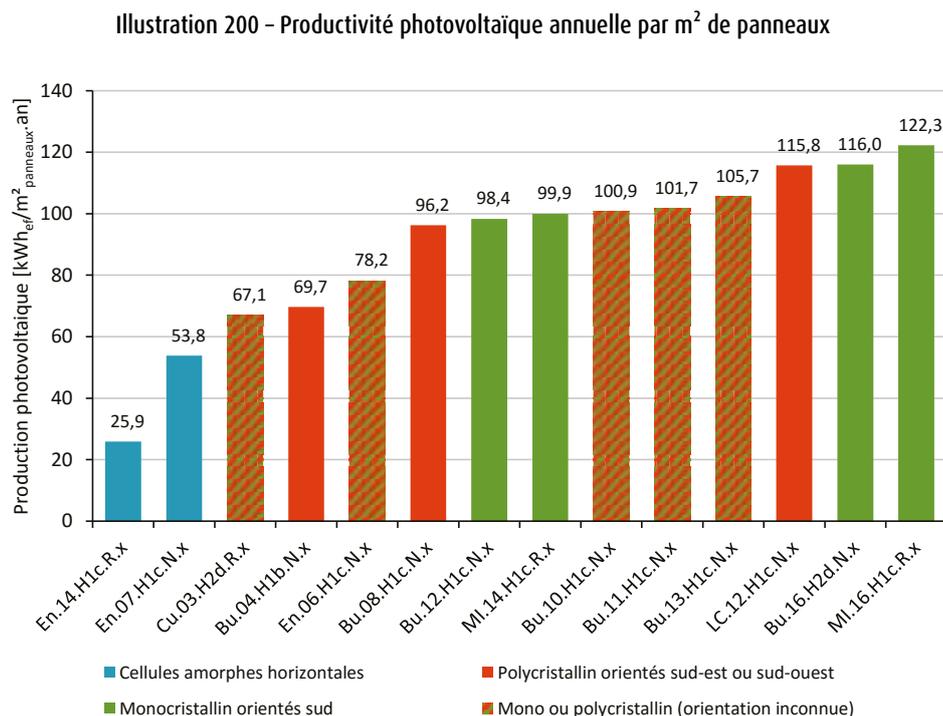
5.9 Installations photovoltaïques

La production photovoltaïque par mètre carré de panneaux installés est connue pour 15 opérations, situées en Bourgogne et en Rhône-Alpes.

Productivité par surface de panneaux installés

La productivité mesurée est de 26 à 54 kWh_{ef}/m²_{panneaux.an} pour des panneaux solaires amorphes.

Pour des panneaux mono- ou polycristallins, elle est comprise entre 54 et 154 kWh_{ef}/m²_{panneaux.an}.



Dans l'échantillon, les cellules amorphes sont systématiquement horizontales, et les panneaux monocrystallins orientés sud.

Les panneaux polycristallins sont orientés SSE ou SSO dans deux cas sur trois. Dans le troisième cas (Bu.04.H1b) les panneaux ont une orientation est, ouest ou sud.

On peut constater une productivité très variable d'une opération à l'autre, dans une même zone climatique avec une même technologie. Ainsi dans la zone climatique H1c, la productivité avec des panneaux monocrystallins orientés sud varie de 98 à 154 kWh_{ef}/m²_{panneaux.an}.

Productivité par kWc installé

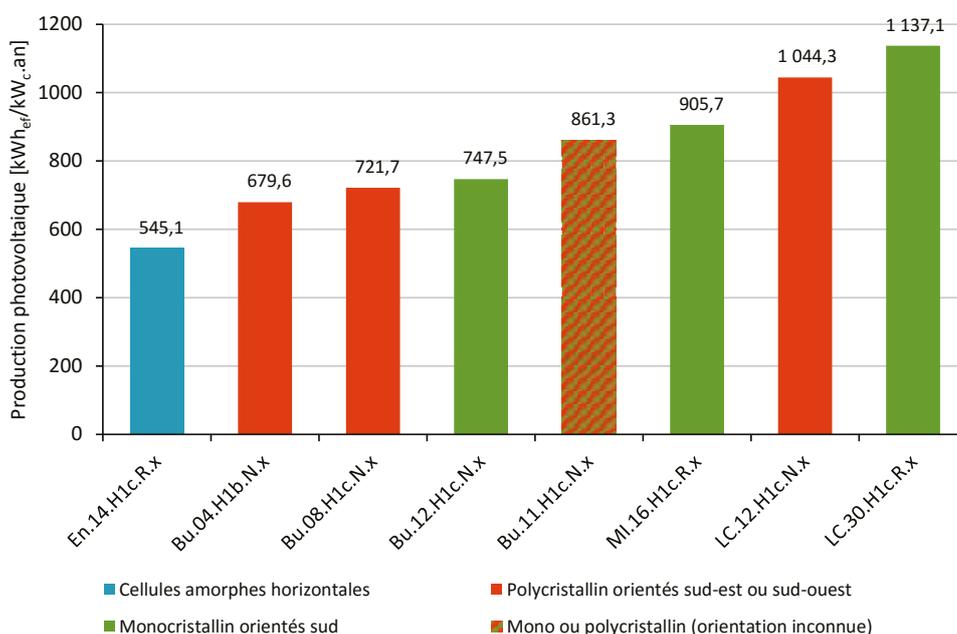
Pour une installation photovoltaïque, le **Watt crête** (Wc) caractérise la puissance électrique maximale pouvant être fournie dans des conditions standard, notamment d'une irradiation de 1000 W/m². Elle permet ainsi de comparer les productivités des capteurs.

Dans l'échantillon, ces données ne sont disponibles que pour des bâtiments en zone H1c, hormis un cas plus au nord, en zone H1b.

La productivité mesurée est de 545 kWh_{ef}/kWc.an pour les panneaux amorphes.

Elle est comprise entre 680 et 1 137 kWh_{ef}/kWc.an pour les panneaux mono- et polycristallins.

Illustration 201 – Productivité photovoltaïque annuelle par kWc installé



Plusieurs raisons expliquent ces variations de performance de production :

- la différence d'ensoleillement qui peut être importante d'un point à l'autre des régions Bourgogne et Rhône-Alpes ;
- la technologie des panneaux, monocristallins ou polycristallins ;
- les différences d'orientation et d'inclinaison des panneaux ;
- des dysfonctionnements à différents endroits de l'installation photovoltaïque (ci-après).

Les dysfonctionnements repérés

Sur l'échantillon, trois types de dysfonctionnement ont été repérés :

- les **pannes d'onduleurs**⁴¹, qui ne permettent plus de récupérer l'énergie produite (le cas ici sur 2 installations) ;

Pour un immeuble de bureaux en Rhône-Alpes :

| « Dès la première année, 6 onduleurs sur 50 sont tombés en panne. »



- l'**absence de raccordement au réseau par ErDF**, qui est courante, plusieurs mois, voire un an après la fin des travaux (ici sur au moins 4 opérations suivies) ;
- la **surchauffe des panneaux** par insuffisance de ventilation en sous-face, qui abaisse le rendement du capteur (le cas d'une installation ici).

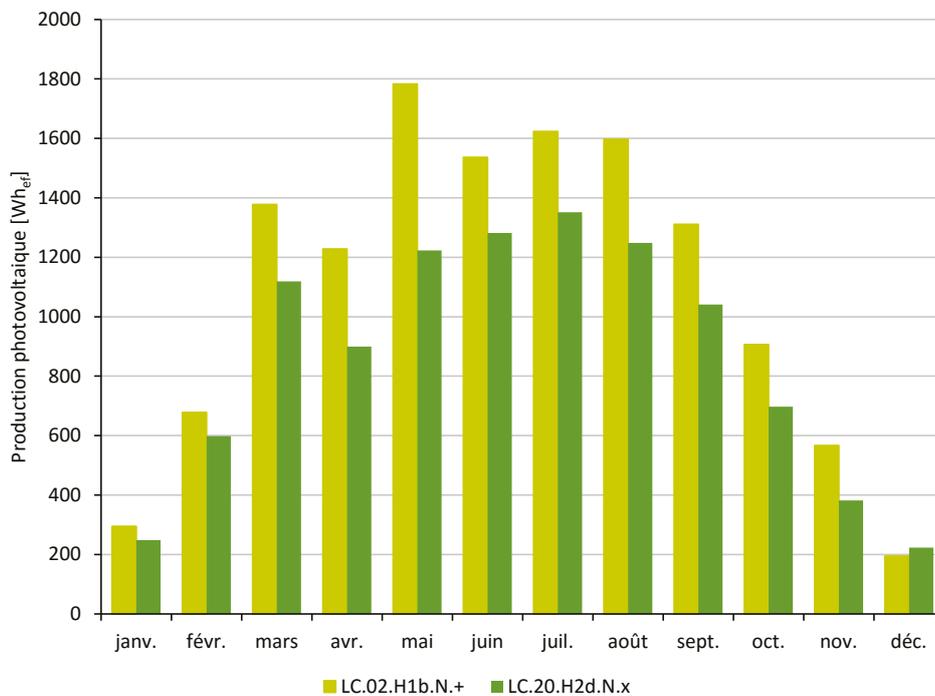
41. Appareil transformant en courant alternatif l'électricité produite en courant continu.

Profil de la production photovoltaïque sur une année

La production photovoltaïque est répartie mensuellement sur le graphe ci-après.

Par rapport aux deux mois d'hiver de décembre et janvier, la production est deux à trois fois supérieure en février et novembre, et plus de six fois de mars à septembre (sept mois).

Illustration 202 - Répartition annuelle de la production photovoltaïque pour deux opérations



Ce graphique montre que la production durant les mois d'hiver est relativement faible du fait de l'ensoleillement moindre, mais qu'elle n'est pas négligeable, d'autant qu'à cette période de l'année l'électricité est carbonée.

Nota : l'objectif de ce graphique est de montrer la répartition annuelle de la production photovoltaïque, et non de comparer les deux installations (ce qui n'est pas possible ici, les productions n'étant pas ramenées au kWc installé).

À retenir

Les installations photovoltaïques suivies en Bourgogne et en Rhône-Alpes permettent de produire jusqu'à 150 kWh_{ef}/m²panneaux.an, et jusqu'à plus de 1000 kWh_{ef}/kWc.an, sous réserve toutefois que l'installation :

- fonctionne toute l'année ;
- soit orientée plein sud et inclinée ;
- soit en cellules rigides, mono- ou polycristallines ;
- ne présente pas de dysfonctionnement (non-raccordement, panne d'onduleur, surchauffe des panneaux...).



Pratiques des acteurs au regard de la performance énergétique

L'essentiel

La performance énergétique d'un bâtiment est étroitement liée aux choix constructifs et à la qualité des systèmes techniques, mais pas seulement. Il existe d'autres paramètres, d'ordres humain et social, qui permettent de comprendre et d'analyser cette performance. Certains d'entre eux méritent une attention particulière, notamment :

- les motivations des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre à s'engager dans une démarche de bâtiment à basse consommation ;
- l'organisation et les pratiques des professionnels du bâtiment.

Le premier point s'avère capital, car il permet une meilleure anticipation des différents enjeux énergétiques et humains dès la phase de conception, et leurs traitements successifs jusqu'aux enjeux essentiels de pilotage et d'entretien. Le second influence directement sur la performance énergétique, notamment en cas de difficulté pour mobiliser les compétences, comme actuellement.

Les bâtiments sont conçus pour accueillir des personnes dans leurs activités professionnelles ou domestiques. Ce sont donc d'abord des lieux de vie et/ou de travail et les usages doivent être pris en compte dès la conception. La manière dont ces occupants s'approprient les différentes caractéristiques d'un bâtiment à basse consommation constitue ensuite un enjeu central pour atteindre la performance énergétique attendue. En effet, si les occupants sont en capacité de s'adapter à un nouveau contexte technique et donc de contribuer à son bon fonctionnement, ils peuvent aussi être sources de dysfonctionnement dès lors que ce fonctionnement est avant tout perçu sous l'angle de la contrainte et de l'inconfort, et ce même s'il s'agit de désagréments ponctuels. La question du confort perçu reste donc un élément à prendre en compte très en amont des projets.

Ces différentes thématiques ont pu être interrogées pour les opérations suivies par le Cerema avec la méthode complémentaire mise en œuvre pour rassembler des informations sociologiques sur les pratiques des acteurs et la qualité d'usage des bâtiments (§ A.5).

6.1 Précisions sur les résultats obtenus

Les tendances présentées ci-après s'appuient principalement sur l'exploitation des résultats sous forme d'indicateurs (méthode en annexe A.5).

Les résultats reposent en effet sur un maximum d'environ 60 opérations (ce chiffre varie en fonction des indicateurs concernés) sur les 119 opérations de l'échantillon 2016, inégalement réparties sur le territoire français. Il faut donc rester prudent dans l'attente de nouvelles évaluations qui viendront progressivement les compléter et fiabiliser.

Les résultats restent encore très partiels et ne permettent pas de conclure définitivement. Volontairement, seuls sont présentés ceux qui paraissent fiables, qui éclairent des données issues de l'instrumentation et/ou qui présentent un intérêt particulier.

6.2 Acteurs de la construction-rénovation

Avant d'aborder l'organisation et les pratiques des professionnels, il y a lieu de s'intéresser tout d'abord aux motivations à entrer dans le dispositif PREBAT et plus largement à s'engager dans une démarche de bâtiment à basse consommation, car elles pèsent, de manière indirecte mais bien réelle, sur les performances des bâtiments.

Les motivations des maîtrises d'ouvrage et des maîtrises d'œuvre comme facteur de réussite énergétique

Des indicateurs complétés sur la motivation de la maîtrise d'ouvrage à entrer dans le dispositif ont été obtenus pour 26 opérations avec des destinations d'usage variées (panel de 12 tertiaires, 3 collectifs et 11 maisons, donc sans prépondérance d'un usage sur les autres). Le profil de la maîtrise d'ouvrage est également un panachage (environ autant de maîtrises d'ouvrage publiques que privées et de bailleurs sociaux). Il est intéressant de constater que les motivations sont diverses et qu'aucune véritable tendance ne se dégage de ce panel spécifique. La motivation économique concerne tout autant d'opérations que l'opportunité de se former ou les convictions militantes (respectivement pour chaque argument 12, 13 et 12 bâtiments, un bâtiment pouvant présenter plusieurs motivations). Ainsi elle n'est pas prépondérante. Seule la volonté d'associer son nom à un projet performant (enjeu d'image) apparaît comme un enjeu plus moteur (21 réponses en ce sens) pour ce panel. Le positionnement de la maîtrise d'ouvrage aura pourtant des répercussions non négligeables sur la réussite du projet et l'atteinte de la performance énergétique.

Sur certaines opérations, les **motivations essentiellement opportunistes** (accès à un label, une subvention ou autres avantages) des maîtrises d'ouvrage et maîtrises d'œuvre induisent un niveau d'exigence minimal, tant dans les phases de définition de l'ouvrage et de conception, que dans la mise en œuvre et l'anticipation de l'exploitation et de la maintenance. La conception puis le suivi de chantier ne bénéficient alors pas d'une attention particulière et l'on observe, plus souvent que dans d'autres projets, des erreurs de conception et des défauts de mise en œuvre imputables à des prescriptions peu rigoureuses et/ou peu suivies. On observe, par ailleurs, une absence d'anticipation des besoins de pilotage et d'entretien des bâtiments qui nuit, à terme, à leur fonctionnement.

A contrario, les équipes qui adoptent une démarche volontaire et s'engagent dans les projets avec plusieurs motivations structurantes telles que la montée collective en compétences, l'apprentissage de nouvelles méthodes, de techniques innovantes et/ou l'expérimentation de matériaux alternatifs, anticipent et donc gèrent mieux les multiples implications d'une construction de type basse consommation. Si elles peuvent pécher par manque d'expérience, elles compensent en recourant à des compétences externes en amont de la conception et/ou en formant les équipes aux différentes techniques et méthodes.

De même, les maîtrises d'ouvrage et les maîtrises d'œuvre qui ont un intérêt objectif à s'engager dans une démarche exemplaire (image commerciale, image de marque, positionnement sur un marché concurrentiel, enjeux de relation avec les locataires...) se montrent la plupart du temps très rigoureuses quant à la définition et au respect strict des cahiers des charges, ce qui représente une garantie du point de vue de la qualité finale.

Ils s'orientent prioritairement vers des matériaux industriels et des solutions techniques éprouvées de façon à maîtriser les risques économiques et les risques en termes d'image. Ce positionnement est peu favorable à la diffusion d'innovations, mais montre qu'il est possible d'atteindre la performance avec des techniques classiques, éprouvées et à la portée de tous.

Les réalisations les plus ambitieuses et les plus originales sont le fait de profils militants et/ou pionniers qui adhèrent aux enjeux de la transition énergétique. On les trouve dans l'expérimentation de solutions très complètes, parfois marginales, et/ou expérimentales, ainsi que dans la mise en œuvre de matériaux alternatifs qui, par définition, contiennent une part d'incertitude plus importante. On observe parfois des dysfonctionnements attribuables à une trop grande complexité de mise en œuvre, de fonctionnement ou encore d'entretien. Le rapport investissement/bénéfices en termes d'économie d'énergie et/ou de confort est parfois défavorable, mais ces opérations restent souvent des réussites du point de vue de la performance énergétique.

Quand l'acteur de la construction est lui-même futur occupant, ces performances exemplaires peuvent toutefois être obtenues au prix de concessions sur le confort qui seraient considérées comme des sacrifices pour d'autres utilisateurs (comme le fait de se chauffer moins).

À retenir

Sur les 27 retours sur les pratiques professionnelles en lien avec la motivation, à part une tendance pour l'enjeu d'image, il n'est pas encore possible de mettre en avant une motivation précise pour construire des bâtiments performants et l'enjeu économique pèse autant que d'autres.

L'engagement des équipes de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre dans les projets apparaît comme essentiel dans l'atteinte des objectifs de performance énergétique. Cet engagement permet une meilleure anticipation des différents enjeux énergétiques et humains dès la phase de conception, induit la production d'un cahier des charges complet et rigoureux en direction des entreprises, enfin initie une réflexion aboutie sur les enjeux essentiels de pilotage et d'entretien.

PREBAT, un dispositif incitatif pour une première opération énergétiquement performante pour beaucoup de maîtrises d'ouvrage

Un indicateur pour caractériser l'expérience de la maîtrise d'ouvrage dans la construction de bâtiments énergétiquement performants (BBC ou BEPOS) a été renseigné pour 26 opérations avec des destinations d'usage variées. Sur ce panel spécifique, il ressort que l'opération PREBAT a été une première expérience de bâtiments performants dans la majorité des cas. D'après les divers témoignages, seules quatre maîtrises d'ouvrage s'étaient déjà engagées dans une telle démarche. Ainsi les bâtiments étudiés ici correspondent aux premières tentatives à partir desquelles des leçons ont pu être tirées. Cela explique les différentes difficultés rencontrées à chaque phase du projet, les acteurs étant novices pour la plupart d'entre eux, et certains écarts sur les performances énergétiques.

Les bâtiments construits aujourd'hui, tout comme ceux qui seront insérés dans le panel de cette capitalisation dans les prochaines éditions, ont bénéficié de cet apprentissage et feront certainement évoluer les enseignements.

À retenir

Sur les 26 retours sur les pratiques professionnelles en lien avec l'expérience, il s'agissait d'une première opération de construction d'un bâtiment énergétiquement performant (BBC ou BEPOS) pour 22 maîtrises d'ouvrage donc pour une grande majorité des opérations.

Certaines difficultés rencontrées au cours des phases du projet sont liées à ce manque d'expérience et disparaîtront pour les futures opérations capitalisées.

Organisation et pratiques des professionnels du bâtiment : des compétences parfois difficiles à mobiliser, qui impactent la qualité de la mise en œuvre

Le questionnaire sous forme d'indicateurs a également interrogé la qualité de la mise en œuvre des systèmes énergétiques et du bâtiment, en général puis système par système, afin de faire un retour sur l'apprentissage des acteurs concernés. Les réponses sont issues d'interviews pour la plupart mais le panel des retours reste, une fois encore, trop limité pour conclure à des enseignements. Nous nous limiterons donc à constater des tendances.

Concernant la mise en œuvre globale (système et bâti), une large part des témoignages va dans le sens d'une bonne mise en œuvre générale (40 opérations sur les 42 retours) mais les dysfonctionnements ponctuels sont récurrents. Ils sont abordés en détail dans les parties 4 et 5. La mise en œuvre est bonne globalement, avec des exceptions pour 17 bâtiments contre 23 pour lesquels aucune critique n'est signalée. Cette même tendance se retrouve vis-à-vis de la mise en œuvre des différents systèmes et des retours sur leur fonctionnement. L'installation de chauffage, d'ECS et de VMC est jugée de bonne qualité pour une partie des répondants (respectivement 30 opérations sur 49, 32 sur 46 et 30 sur 48) mais les signalements de pannes ponctuelles sont nombreux si bien que les avis sur la qualité sont dégradés pour un panel non négligeable (respectivement pour 18, 14 et 18 opérations). Pour plusieurs opérations, pour la production d'ECS et pour la VMC, les pannes apparaissent même comme récurrentes.

Il n'est pas fait ici allusion à la climatisation car l'indicateur associé ne possède pas assez de références pour être exploitable.

Les retours présentés sont cohérents avec les observations des suivis de chantiers.

En effet, celles-ci ont mis en évidence des exemples fréquents de défauts dans la mise en œuvre allant d'un manque de soin dans la pose des isolants à l'erreur manifeste de dimensionnement d'exécution des installations ECS, en passant par une mise en service et un entretien défaillants des systèmes de ventilation. Ces défauts découlent dans certains cas d'erreurs de conception ou de prescription mais sont le plus souvent la conséquence de **profils de main-d'œuvre et de pratiques professionnelles inadaptés**, qui prennent une importance accrue lorsque le niveau d'exigence est plus élevé. Ces difficultés sont structurelles, mais aussi conjoncturelles.

Le **contexte économique dégradé** a, en effet, un impact très défavorable sur les compétences, les entreprises qualifiées étant contraintes de baisser leurs prix, donc leurs marges, ce qui les fragilise. Des ouvriers bien formés et expérimentés quittent même définitivement le secteur à l'occasion d'une des nombreuses périodes de baisse d'activité dans le secteur du bâtiment. S'ajoutent également les défaillances d'entreprises en cours de chantier, plus nombreuses dans un contexte économique difficile, qui fragilisent les objectifs de performance dans la mesure où l'urgence augmente le risque de recrutement d'entreprises disponibles mais moins expérimentées. Cela peut être encore vrai aujourd'hui mais cela l'était particulièrement pendant la phase chantier des bâtiments du panel.

D'un point de vue structurel, l'organisation du secteur du bâtiment reste encore aujourd'hui imprégnée par un **modèle artisanal de la compétence**. D'un côté, ce modèle confère aux entreprises la reconnaissance d'une compétence légitimée par la spécialisation, l'expérience et le temps long, mais d'un autre côté, ce même modèle a tendance à rallonger les processus d'intégration des innovations, que ce soit dans le domaine des modes constructifs, des matériaux ou des systèmes techniques. Dans un contexte où les offres techniques se multiplient à un rythme soutenu, les entreprises éprouvent des difficultés à anticiper, puis intégrer les compétences nécessaires à leur mise en œuvre. Divers exemples ont déjà été évoqués : surdimensionnement des systèmes de chauffage, les anciennes pratiques n'étant plus adaptées aux bâtiments performants ; mauvaise mise en œuvre des systèmes de production d'ECS solaire, ceux-ci n'étant pas encore maîtrisés ; mauvais réglage du bypass des VMC double flux...

Le **manque de recul et de retours d'expérience** sur ces matériaux et technologies nouveaux, le **manque de maturité de certains systèmes** aggravent encore les difficultés des entreprises qui se trouvent trop souvent en situation d'improviser face à des cahiers des charges de plus en plus complexes. Il existe donc un véritable enjeu de formation initiale et continue, puis de maintien des compétences dans un secteur exposé à de fortes tensions économiques et de plus en plus régulièrement soumis à des injonctions de changement d'un point de vue organisationnel.

Des **insuffisances de collaboration et de coopération** ont également été pointées entre les différents corps de métier, mais aussi entre architectes, bureaux d'études et entreprises, et en amont, au niveau de la qualité des relations entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre.

Des **manques d'anticipation des usages réels** et de prise en compte du confort sous l'angle humain et social (chapitre 7) sont également récurrents.

6.3 Des acteurs de la construction à ceux de l'utilisation

Les occupants et exploitants étant aux commandes de bâtiments plus sensibles ou complexes, les acteurs de la construction ont également davantage à faire face aux enjeux liés à leur **pilotage**, en particulier en matière de régulation, et à leur entretien. Ces problèmes ne sont pas nouveaux, mais comme les mesures l'ont mis en évidence, ils deviennent cruciaux pour les bâtiments à basse consommation. Or les évaluations ont montré qu'ils sont trop souvent sous-estimés, voire négligés dans toutes les phases du projet.

En particulier, les compétences et **expertises à mobiliser** pour un fonctionnement optimal du bâtiment après livraison ne sont pas toujours anticipées par la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre. Dans le cas où un contrat existe, l'acteur de la maintenance n'est par exemple pas toujours suffisamment formé et associé en amont. Ce manque de compétence conduit parfois à regretter le choix de la technologie mise en œuvre et à promouvoir une solution plus simple pour les futurs projets.

Les retours sous forme d'indicateurs apportent un complément sur cette thématique. Sur les 26 témoignages recueillis, il n'est actuellement pas possible de confirmer que les réglages, équilibrages et programmations des différents systèmes ont bien été réalisés à la livraison. De là à penser qu'il y a également inadéquation pendant la vie du bâtiment, il n'y a qu'un pas qui est facilement franchi au vu du petit nombre de personnes dédiées à la gestion des bâtiments et du manque de connaissances des occupants sur leurs installations. Cela est accentué par l'absence de passage de relais entre l'acteur de l'installation et celui de la gestion.

En outre, les problèmes de pilotage et d'entretien peuvent conduire à des dysfonctionnements importants ainsi qu'à un inconfort ressenti par les occupants.

Enfin, il faut s'intéresser à l'acteur de l'utilisation.

La façon dont les futurs occupants vont pouvoir s'approprier les équipements ne fait également que rarement l'objet d'une réflexion aboutie. Les occupants se trouvent alors souvent face à des technologies qu'ils ont du mal à appréhender, nécessitant parfois un entretien régulier et coûteux, ou à des systèmes qui, de leur point de vue, génèrent de l'inconfort, jusqu'à de la contrariété (Chapitre 7).

Les indicateurs ont permis d'interroger la qualité d'appropriation des différents systèmes et des résultats ont pu être obtenus pour le résidentiel.

Les premières tendances montrent assez clairement l'existence de difficultés récurrentes dans l'apprentissage et l'appropriation des systèmes par les occupants en contexte résidentiel. Ainsi sur les 37 opérations pour lesquelles nous disposons de données fiables (panachage de profils différents: 10 propriétaires occupants de maison individuelle, 17 locataires de logement social et 10 locataires de logement privé), il apparaît, et ce quel que soit le système considéré, qu'environ la moitié des répondants éprouve des difficultés face aux systèmes. Il s'agit pour la majorité de locataires du parc social (appartement ou maison). Les systèmes de chauffage (systèmes dans leur ensemble dont la régulation) représentent ensuite un problème pour l'ensemble ou une partie des occupants dans 18 opérations. Cela concerne à la fois des locataires du parc social (7 opérations collectives et 6 maisons) mais également des propriétaires occupants (4 maisons). Pour comparaison, dans 18 cas, le système apparaît comme ne présentant pas de difficultés particulières, avec surtout des maisons dont les occupants sont propriétaires ou locataires du parc privé.

L'appropriation des systèmes de VMC (compréhension du fonctionnement et de l'enjeu) présente sensiblement les mêmes résultats puisque sur un total de 35 opérations (10 propriétaires occupants de maison individuelle, 16 locataires de logement social et 9 locataires de logement privé), seules 18 témoignent d'une bonne appropriation. Il s'agit surtout ici des propriétaires occupants, les locataires du social rencontrant davantage de difficultés. Nous ne disposons pas de données suffisantes concernant les systèmes de climatisation.

Cette tendance s'explique par plusieurs facteurs. L'appropriation dépend en premier lieu de la complexité des systèmes, de la qualité des interfaces et enfin de la qualité de mise en œuvre qui peut venir perturber la prise en main des systèmes. Le second facteur tient plus spécifiquement aux compétences des occupants. Il est évident qu'un occupant qui n'a jamais régulé thermiquement son logement sera potentiellement plus en difficulté face à la nécessité d'intervenir sur son chauffage. De la même façon, l'intervention sur une VMC qui consiste la plupart du temps à en réguler le débit peut sembler simple, mais peut représenter une véritable difficulté dès lors que l'on n'en a pas saisi le fonctionnement. Des guides ou des informations sur le fonctionnement des systèmes pourraient ainsi être d'une grande aide. Le troisième facteur est plus difficile à évaluer puisqu'il renvoie à la définition du confort, aux moyens dont on dispose pour l'atteindre et à la perception du rôle joué par tel ou tel système dans le sentiment d'inconfort. L'exemple de la VMC est emblématique puisque la perception de l'apport de froid par l'entrée de l'air neuf dénoncée comme « courant d'air » par certains occupants, ou encore les problématiques acoustiques générées (« on entend ses voisins ») peuvent être vécues comme un dysfonctionnement qui amène les occupants à intervenir sur le dispositif, créant de fait de nouvelles nuisances (défaut d'aération, humidité, moisissures...).

En effet, on oublie souvent que les occupants sont avant tout usagers du bâtiment et non acteurs de la performance. Cela vaut pour toutes les thématiques techniques dont l'énergétique. Ils viennent pour habiter/ occuper l'opération avec des motivations et une sensibilité à la performance énergétique qui leur est propre mais qui n'est, en général, pas le critère prédominant pour le choix des lieux. Les indicateurs ont permis de recueillir des informations sur la sensibilité des occupants. Sur un panel de 38 opérations résidentielles et 22 opérations tertiaires, leur exploitation montre que les occupants sont plutôt peu sensibles ou peu concernés par les questions de performance énergétique (26 opérations en résidentiel et 15 en tertiaire) même si on dénombre une part d'occupants fortement sensibilisés voire militants (12 opérations en résidentiel et 4 en tertiaire), surtout chez les propriétaires occupants.

A contrario, tous les occupants recherchent la qualité d'usage et le confort dans leur bâtiment.

À retenir

La performance énergétique ne peut être atteinte qu'avec le concours des occupants, dont il convient d'anticiper au mieux les attentes, les besoins et les compétences puisque l'enjeu énergétique n'est en général pas leur préoccupation principale.

Les pratiques des utilisateurs susceptibles d'entraver la performance énergétique proviennent généralement :

- soit de dispositifs inadaptés à leur mode de vie ;
- soit de la difficulté à piloter ou entretenir les équipements du bâtiment ;
- soit d'un inconfort ressenti les amenant à les modifier.

Or, bien que cruciaux, les enjeux de réglage et de programmation ne sont pas toujours pris en compte et ceux de pilotage et d'entretien ne sont pas suffisamment anticipés dans les projets.



Confort thermique et qualité d'usage

L'essentiel

L'évaluation de la performance des bâtiments ne peut se limiter à l'étude de leurs consommations d'énergie: le confort pour l'occupant - et plus largement la qualité d'usage - en constitue un élément important et très largement lié aux consommations. En effet, le confort constitue souvent le mode de perception principal du bâtiment par l'occupant et les arbitrages qu'il opère pour assurer ce confort peuvent jouer fortement sur les consommations.

Le confort thermique des bâtiments à basse consommation suivis est jugé très satisfaisant en période hivernale par les occupants, en accord avec les mesures, du fait des niveaux d'isolation et de la qualité des équipements de chauffage.

En revanche, l'appréciation du confort estival est plus mitigée. La forte isolation des bâtiments à basse consommation n'est pas nuisible au confort d'été mais le rend plus sensible à la qualité de la gestion thermique: l'obtention du confort thermique d'été dans les logements implique alors davantage les occupants dans l'utilisation des protections solaires et l'ouverture nocturne des fenêtres. Cette gestion thermique nécessite une acculturation qui est acquise en zone méditerranéenne mais reste à généraliser sur l'ensemble du territoire. Ainsi la problématique du confort thermique en saison chaude des bâtiments à basse consommation n'est pas spécifique à la zone méditerranéenne.

Par ailleurs, il apparaît que la norme sur le confort adaptatif permet une évaluation plus fine du confort thermique en saison chaude que le critère du nombre d'heures à plus de 28 °C. Les résultats obtenus apparaissent davantage en phase avec le ressenti des occupants.

Enfin, des niveaux de température très élevés peuvent être constatés en mi-saison dans certains bâtiments.

7.1 Satisfaction des occupants et confort perçu

La notion de confort constitue, dans la plupart des cas, le mode de perception principal des bâtiments par les occupants. Leur satisfaction ou insatisfaction reste donc très liée à la capacité de la technique à concourir à la production d'un environnement confortable. La perception individuelle et/ou collective conduit à des arbitrages et des compromis au sein de la famille en résidentiel (par exemple le choix de la température de consigne, de l'aération des pièces...) et entre collègues dans les bâtiments tertiaires lorsque les salariés ont la main sur certains paramètres (éclairage, ouverture de fenêtres, veilles...), qui jouent plus ou moins fortement sur les consommations d'énergie.

Parmi les critiques les plus souvent remontées, la **ventilation et le confort thermique** constituent sans doute les points qui **suscitent le plus de tensions et le plus d'interventions et contournements** de la part des occupants.

En effet, il n'existe pas de confort thermique universel. La **dimension physiologique est à compléter par la construction socio-historique**, laquelle évolue en fonction des techniques disponibles et des normes sociales.

Le bien-être thermique, bien que dépendant de la température objective, est en partie déterminé par des paramètres aussi complexes que nombreux, tels que l'âge et l'activité des occupants, les codes vestimentaires en vigueur dans les bâtiments tertiaires, l'ambiance lumineuse, le recours possible à une ventilation naturelle et la tolérance aux bruits extérieurs s'il est nécessaire de maintenir les fenêtres ouvertes, la capacité à trouver des alternatives pour atteindre un bon niveau de confort (faire des boissons chaudes en hiver ou accéder à de l'eau fraîche en été, adapter les vêtements à la température...), la possibilité d'agir sur le système, ou encore les attentes développées par les occupants vis-à-vis des systèmes techniques.

Le confort thermique n'est donc pas un état stable mais un processus permanent de recherche pour lequel l'occupant souhaite garder la main. Une température permanente et homogène et une automatisation du pilotage ne garantissent donc pas un bon niveau de satisfaction des occupants.

Méthode de recueil des informations sur le confort et précisions sur les résultats obtenus

Comme pour les pratiques des acteurs, des questionnaires approfondis et des indicateurs ont été exploités pour la capitalisation 2016 afin de caractériser le confort des occupants en lien avec diverses thématiques telles que la qualité d'appropriation des différents systèmes (chauffage, VMC...), l'appréciation du confort thermique, lumineux ou encore acoustique, l'appréciation de la performance énergétique du point de vue de l'occupant. Ces outils ont été utilisés dans une démarche *a posteriori* également destinée aux suiveurs. Ils visent à capitaliser les informations issues d'interviews, de questionnaires des usagers et dans une moindre mesure de l'évaluation de la personne en charge du suivi des opérations (collecte de toutes les informations recueillies par le suiveur, y compris de son ressenti). À nouveau, les résultats ont été variables et le panel exploitable est plus réduit que celui sur lequel s'appuient les analyses techniques des autres parties de ce rapport. Ainsi des retours sur la qualité d'usage ont été obtenus pour 59 opérations sous forme d'indicateurs et pour 39 bâtiments sous forme de commentaires, sur les 84 interrogées. Les tendances présentées ci-après, en parallèle des résultats techniques obtenus à partir du panel initial de 120 opérations, s'appuient donc principalement sur l'exploitation des indicateurs et, au vu des résultats, concernent davantage les bâtiments résidentiels, sauf mention contraire.

Ces tendances seront naturellement complétées et fiabilisées au fur et à mesure de l'augmentation du panel initial et des différents retours, dans les prochaines éditions.

7.2 Confort thermique : différents enjeux selon les saisons

Les analyses portent principalement sur le confort thermique qu'il soit d'hiver, d'été ou de mi-saison. Les enjeux de ces analyses sont différents :

Enjeux pour le confort d'hiver

Les bâtiments à basse consommation demandent une attention particulière sur les émissions de chauffage pour obtenir un confort thermique satisfaisant. En effet, les apports internes et solaires dans des enveloppes fortement isolées conduisent à des besoins thermiques très faibles. L'enjeu est ainsi placé sur les émissions car les performances thermiques des parois opaques et des parois vitrées conduisent à la maîtrise complète des rayonnements froids en hiver. L'inertie thermique joue aussi un rôle important dans la régulation des apports internes solaires en particulier en mi-saison.

Enjeux pour le confort d'été

Dans les bâtiments à basse consommation, le confort d'été demande une attention particulière du fait de leur forte isolation thermique. En effet, celle-ci permet de retenir davantage la chaleur dans le bâtiment, ce qui est l'objectif en hiver, mais pas en été où les apports thermiques internes et solaires doivent être évacués. Ce risque de surchauffe d'été fait alors porter l'enjeu à la fois sur la protection solaire pour réduire les apports solaires, sur l'inertie pour amortir les apports internes et solaires à travers l'enveloppe, et sur la ventilation pour les évacuer.

Enjeux pour le confort de mi-saison

Dans les bâtiments à basse consommation, le confort de mi-saison demande une maîtrise des émissions de chauffage et des apports solaires par les baies pour éviter des températures inconfortables. L'inertie thermique des émetteurs et du bâtiment joue un rôle important dans la régulation de ces apports dans ces périodes où la stratégie de gestion thermique oscille entre confinement des apports et rafraîchissement thermique d'été.

7.3 Confort thermique d'hiver

Le niveau de confort en hiver des bâtiments est globalement satisfaisant

Globalement, les enquêtes réalisées auprès des occupants dans les bâtiments suivis montrent que le confort thermique **en hiver** est jugé très satisfaisant dans 76 % des cas (47/62). Les insatisfactions portent sur une température localement trop faible (émission soufflante en salle de bain) ou sur des apports solaires trop élevés associés à une émission à inertie lourde par plancher (MI.22.H1c.N.°). Dans un cas (He.02.H1c.N.-), l'inconfort résulte d'un dysfonctionnement de la régulation centrale sur la température extérieure, ce qui relève des réglages de l'installation.

Remarque: les données relatives aux mesures des températures intérieures sont présentées au § 3.1.1 relatif aux températures de consigne alors que ce chapitre présente les données relatives à la satisfaction.

Cette tendance est confirmée par l'exploitation des indicateurs (panel restreint). Des retours ont été obtenus pour 36 opérations résidentielles. Sur ce panel, seules 6 présentent des inconforts légers qui sont compensés par l'utilisation de chauffage d'appoint. Via les indicateurs, nous n'avons pas à ce stade la possibilité d'analyser dans les détails les raisons de ces inconforts mais nous pouvons faire l'hypothèse qu'il s'agit principalement de problèmes d'appropriation des systèmes déjà soulignés, de dysfonctionnements des systèmes de chauffage qui peuvent générer une surchauffe du logement, ou encore de difficultés à atteindre la température souhaitée de manière homogène.

L'échantillon tertiaire confirme cette appréciation positive du confort d'hiver mais les résultats sont toutefois plus nuancés. Sur 21 opérations considérées, 15 semblent atteindre le confort thermique souhaité. Mais 6 opérations semblent présenter des inconforts qui ne sont que peu compensés par des dispositifs d'appoint (cas dans 3 opérations tout de même). Les inconforts peuvent être vécus plus difficilement par les occupants de bâtiments tertiaires, dans la mesure où non seulement ils n'ont généralement pas la main sur le système de chauffage, mais ils peuvent également subir leur localisation dans le bâtiment : les occupants dont les bureaux ou les locaux professionnels se trouvent au nord se plaignent du froid, ceux qui sont orientés au sud ont trop chaud.

Naturellement cette situation n'est pas exclusive au tertiaire.

Dans tous les cas, ne pas avoir la main sur les systèmes renforce le sentiment d'inconfort.

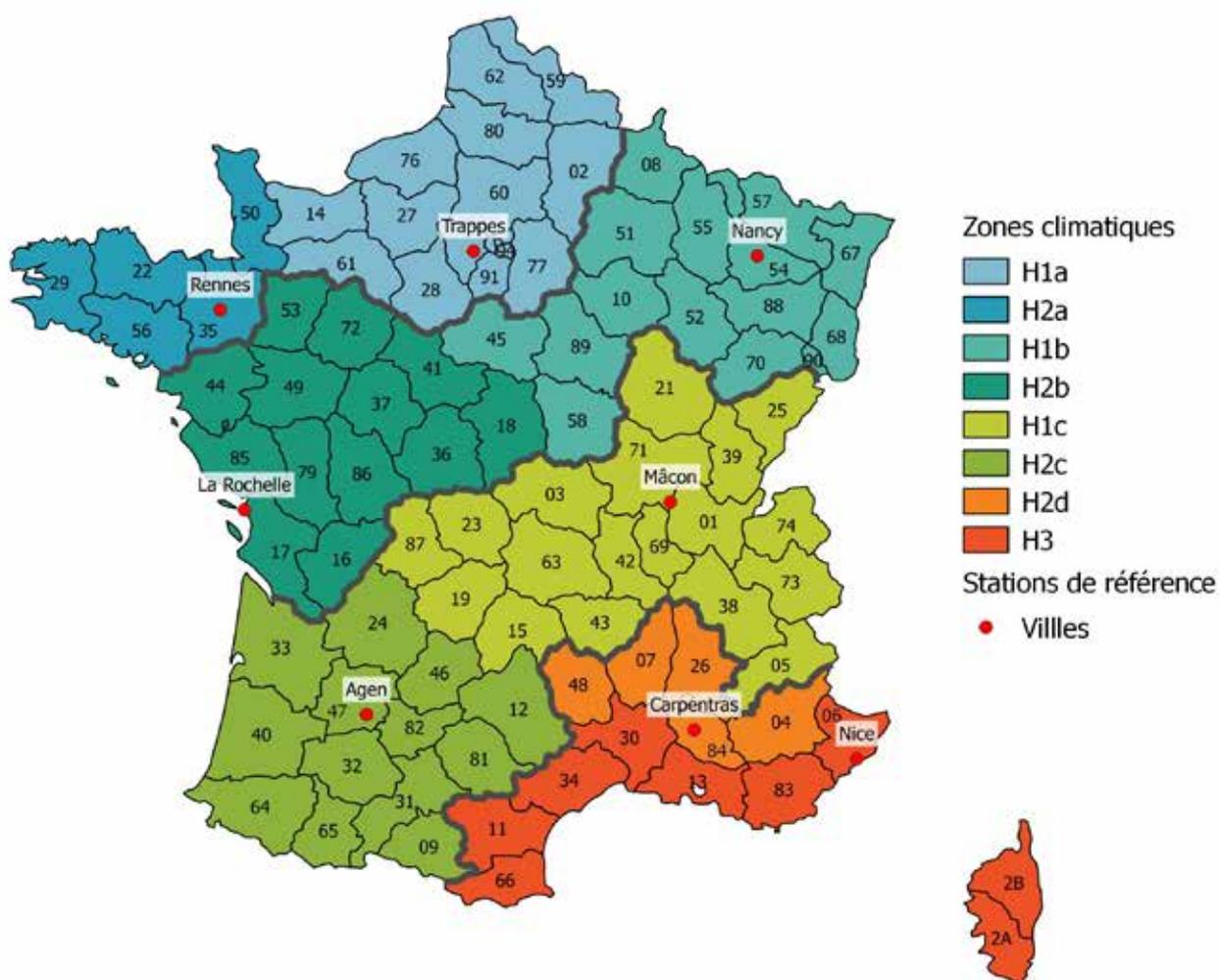
7.4 Confort thermique d'été

Préambule : les zones climatiques d'été sont nommées dans ce rapport par les lettres a à d (nomenclature issue de la RT 2000 et toujours utilisée en RT 2005) selon l'altitude du site sur la base d'un pas de 300 m correspondant à une variation de la température extérieure de 1,5 °C.

Illustration 203 - Classement en zones climatiques d'été selon l'altitude

	Zone a	Zone b	Zone c	Zone d
H1a - H2a	Toutes altitudes			
H1b - H2b	Altitude supérieure ou égale à 300 m	Altitude inférieure à 300 m		
H1c - H2c	Altitude supérieure ou égale à 600 m	Altitude comprise entre 300 m et 600 m	Altitude inférieure à 300 m	
H2d - H3	Altitude supérieure ou égale à 900 m	Altitude comprise entre 600 m et 900 m	Altitude comprise entre 300 m et 600 m	Altitude inférieure à 300 m

Illustration 204 - Zones climatiques d'été



7.4.1 Le niveau de confort en période estivale des bâtiments non climatisés varie d'excellent à passable

Pour les années de suivi, la majorité des bâtiments non climatisés (30/54) ont un confort thermique d'été satisfaisant (moins de 50 heures au-delà de 28 °C, seuil considéré comme la limite haute de la zone de confort).

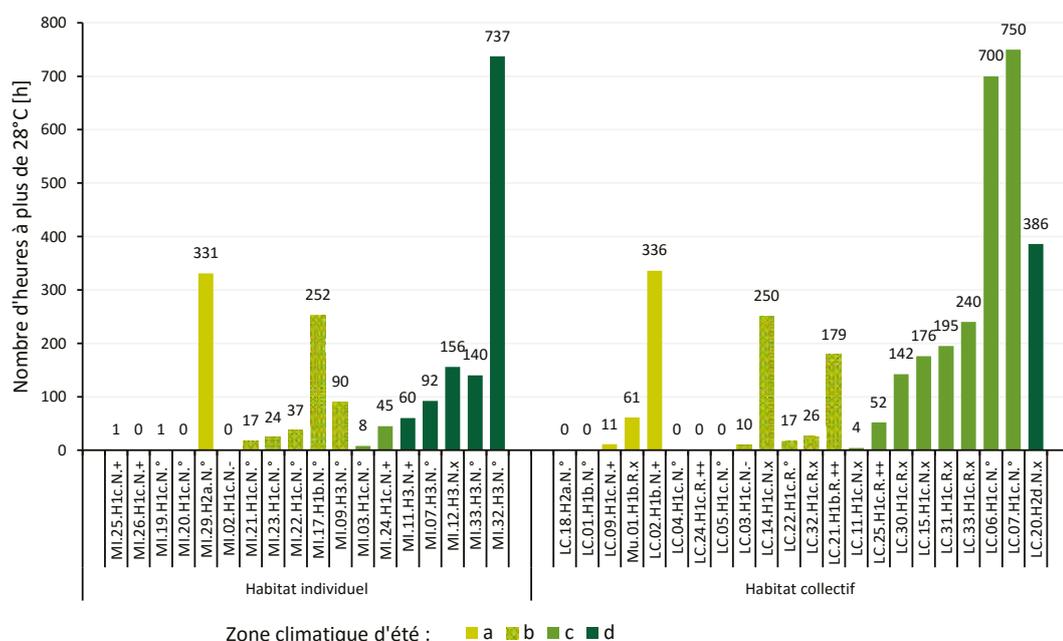
Si l'on considère un seuil de 200 heures par an comme constituant un inconfort permanent en saison chaude (une durée cumulée d'inconfort de 200 heures ne représente toutefois que 2 % de l'année), on constate qu'il existe des bâtiments inconfortables (9/54) dans toutes les zones climatiques y compris la plus clémente (zone a), ce qui montre que la problématique de l'inconfort thermique en saison chaude n'est pas spécifique à la zone méditerranéenne (2 cas en zone a, 2 cas en zone b, 3 cas en zone c et 2 cas en zone d).

Parmi ces cas, un petit nombre (3/54) présente un inconfort thermique très marqué à plus de 500 heures par an : un premier cas (MI.32.H3.N.°) porte sur des logements individuels en bande en zone méditerranéenne (zone d) munis d'une fenêtre de toit donnant sur le vide d'escalier. La défaillance de la télécommande a conduit à ne pas utiliser la protection solaire motorisée. Les deux autres cas sont des bâtiments collectifs d'habitation en zone c dont l'un (LC.03.H1c.N.°) a des façades exposées au bruit (classe BR3) induisant une pratique d'ouverture nocturne des fenêtres très faible. Le troisième cas (LC.24.H1c.N.°) montre que les fenêtres ne sont ouvertes qu'en soirée et rapidement fermées la nuit bien qu'il fasse plus de 29° dans les logements instrumentés.

Hormis le cas particulier cité pour la zone d, les maisons individuelles situées en zone d présentent de bons résultats. La forte isolation des parois opaques des bâtiments BBC induit en effet une réduction des apports solaires supérieure à l'effet de confinement des apports solaires et internes.

Cependant la quasi-totalité des opérations évaluées (52/54) ne sont pas exposées au bruit, ce qui a permis aux occupants d'éviter le confinement des apports solaires et internes en ouvrant librement les baies la nuit.

Illustration 205 – Évaluation du confort thermique d'été de 54 bâtiments sur la base de la durée moyenne d'une exposition à plus de 28 °C



Nota : les résultats sont dépendants de la rigueur des saisons pendant lesquelles les opérations ont été évaluées : été 2009 = 2 opérations, été 2010 = 10, été 2011 = 6, été 2012 = 9, été 2013 = 18, été 2014 = 7, été 2015 = une opération. Ces saisons n'ont pas présenté de canicule.

Illustration 206 – Bâtiment LC.07.H1c.N.° : gestion de l'ouverture nocturne des fenêtres et effet sur la température intérieure de quatre logements



À retenir

La problématique du confort thermique des logements BBC en saison chaude n'est pas spécifique à la zone méditerranéenne. L'exposition au bruit est un facteur pouvant conduire à l'inconfort thermique par la contrainte qu'elle impose à l'occupant sur l'ouverture nocturne des fenêtres.

Cette tendance est confirmée par l'exploitation des indicateurs. Des retours ont été obtenus pour 32 opérations résidentielles. Sur ce panel, pour les deux tiers de l'échantillon, soit 20 opérations, le confort d'été est estimé agréable. Pour 12 opérations, il existe un sentiment d'inconfort qui n'est pas compensé par le recours à un dispositif d'appoint pour rafraîchir tel qu'un climatiseur mobile. Seules 3 opérations sont concernées par ce type de dispositif.

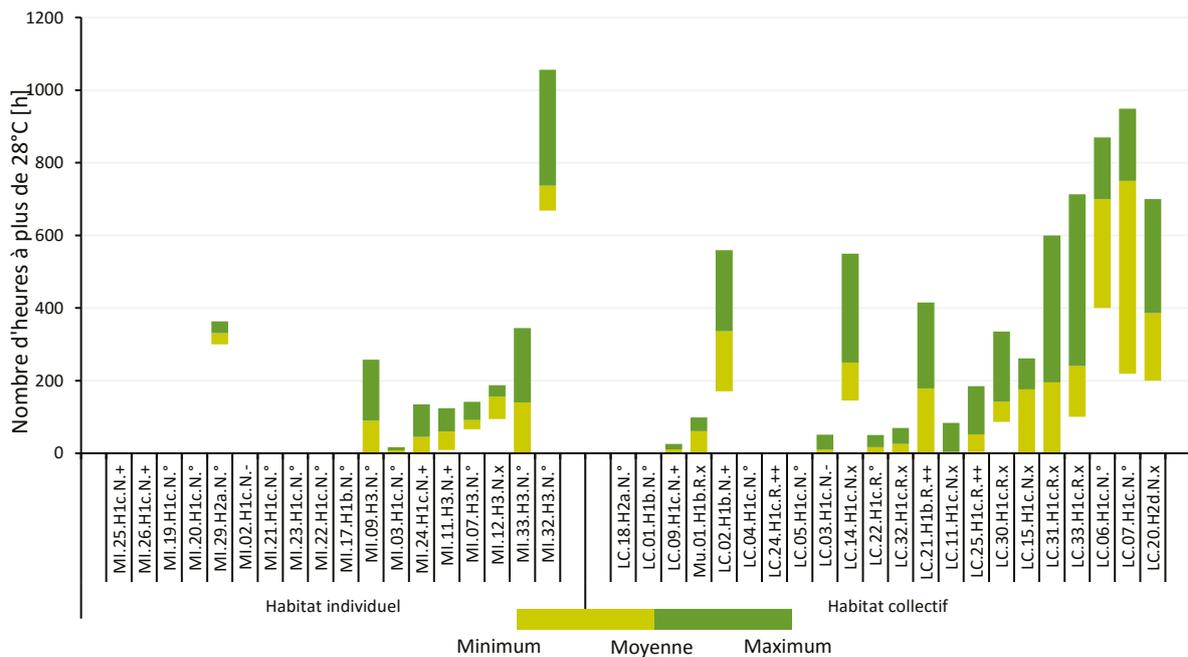
Cette tendance s'observe également en tertiaire puisque sur les 20 opérations pour lesquelles nous disposons de données, 6 sont concernées par des retours négatifs concernant le confort d'été. Pour aucune d'entre elles il n'y a eu toutefois de recours à des dispositifs de correction de l'inconfort tels les ventilateurs et climatiseurs, ce qui laisse supposer que cela reste gérable.

Les inconforts en résidentiel comme en tertiaire proviennent la plupart du temps de difficultés de gestion des apports solaires en lien avec la gestion des ouvrants et des occultants (lorsqu'ils existent, ce qui n'est pas toujours le cas). Ainsi, si une grande partie de l'échantillon semble s'approprier correctement les protections solaires et les ouvrants, pas moins de 11 opérations signalent des difficultés. Cela est cohérent avec le nombre d'opérations concernées par le sentiment d'inconfort. Les inconforts peuvent également provenir d'une confusion dans l'utilisation de la VMC double flux qui est perçue comme un rafraîchisseur. Dans beaucoup de logements, le débit est alors poussé à son maximum les jours les plus chauds, provoquant au contraire une entrée d'air surchauffé.

7.4.2 Le niveau de confort varie au sein d'un même bâtiment selon les modes d'occupation

Le niveau de température intérieure varie d'une pièce à l'autre (mesures en maison individuelle) et au sein d'un bâtiment collectif d'habitation où l'on constate des écarts de plus de 4 °C correspondant à des durées d'inconfort thermique variant du simple au double.

Illustration 207 – Durées minimales et maximales de l'inconfort thermique au sein d'un même bâtiment



Le niveau de confort peut être simultanément satisfaisant et très mauvais au sein d'un même bâtiment selon les logements. Ces variations du niveau de confort au sein d'un même bâtiment sont à mettre en rapport avec les modes d'occupation (utilisation des protections solaires et des ouvertures des fenêtres et apports internes). En effet, le mode de gestion thermique d'été détermine fortement le niveau de confort : ainsi des pièces orientées au nord ou nord-est peuvent être plus chaudes que des pièces orientées au sud ou à l'ouest dès lors que les fenêtres ne sont pas ouvertes la nuit.

Il y a un enjeu à sensibiliser les usagers, en particulier en dehors des zones méridionales, sur les bonnes pratiques de gestion thermique d'été.

Il est cependant délicat de distinguer dans les modes de gestion inadaptés ce qui relève d'un manque d'information de ce qui relève de la satisfaction d'autres besoins (recherche de luminosité interne abondante, fermeture des fenêtres la nuit liée au sentiment d'insécurité...) ou encore du poids des habitudes acquises hors période de forte chaleur. Ainsi les occupants peuvent se plaindre de devoir utiliser les volets du séjour pour éviter les surchauffes (cas d'un bâtiment BBC en Franche-Comté).

À retenir

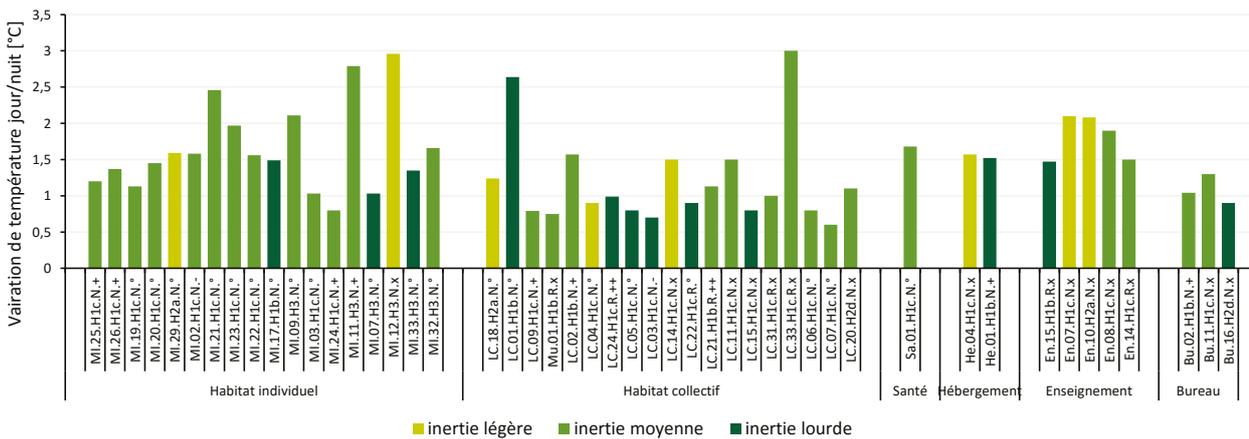
Les logements BBC sont plus sensibles à la gestion thermique d'été du fait du niveau de confinement des apports internes et solaires par les parois opaques plus isolées. Les pratiques de gestion thermique par les occupants prennent ainsi une importance accrue.

7.4.3 Les températures baissent peu la nuit

L'écart moyen jour/nuit de la température intérieure varie entre 0,7 °C et 3 °C.

Les variations jour/nuit ne sont pas très marquées par les climats: en effet les variations constatées en zone a sont équivalentes à celles mesurées en zone méditerranéenne bien que cette zone présente davantage de variations horaires dans la stimulation climatique (action de la température et de l'ensoleillement).

Illustration 208 – Variation jour/nuit des températures intérieures



La variation la plus forte de 3 °C a été observée en zone méditerranéenne sur une maison individuelle à faible inertie (n° MI.12.H3.N.x: ossature bois et enveloppe complète en paille: murs, toiture et plancher avec chape de béton). Cette variation peut conduire à des températures ressenties trop faibles après une nuit d'ouverture des fenêtres. Cette maison ne présente pas de surchauffe trop importante du fait, d'une part, de la protection solaire apportée par l'isolation de la toiture et des murs, d'autre part de l'évacuation de la chaleur par ouverture des fenêtres.

Les bâtiments collectifs d'habitation présentent en général une forte stabilité (faible écart jour/nuit) qui peut être imputée en partie à la réduction des apports solaires par les parois opaques et à l'inertie, mais aussi à une plus faible ventilation thermique d'été par ouverture des fenêtres (capacité de balayage transversal de l'air plus faible, bruits de voisinage, sentiment d'insécurité).

La dispersion des résultats est principalement liée aux apports solaires et aux modes d'occupation variables d'une opération à l'autre.

Les résultats qualitatifs sur deux bâtiments d'enseignement montrent aussi une évacuation insuffisante de la chaleur par la ventilation (ventilation mécanique et ouverture des fenêtres en période d'inoccupation).

À retenir

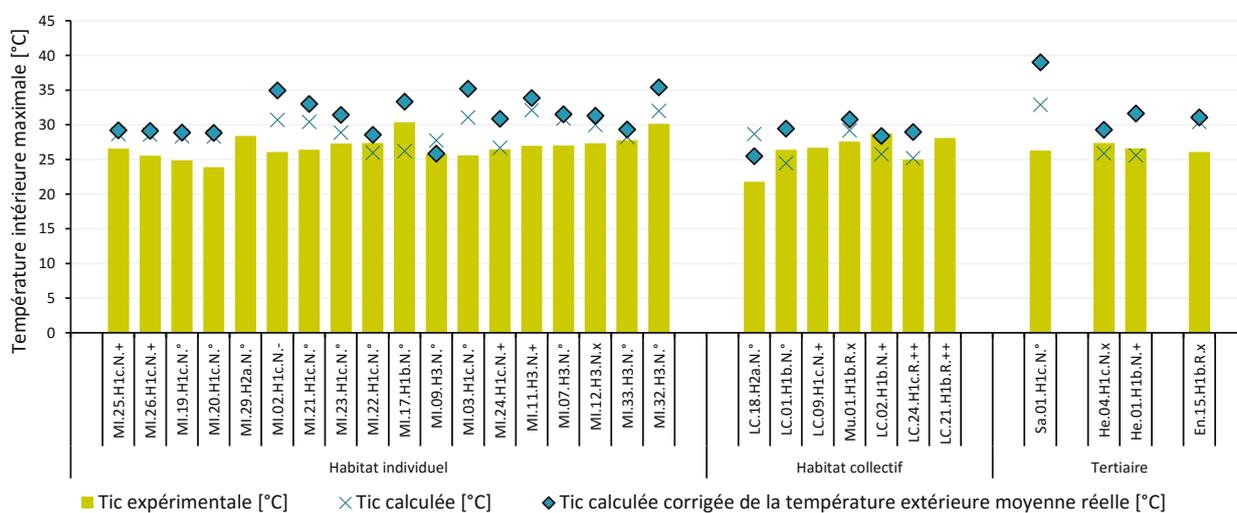
Les températures intérieures des bâtiments BBC sont relativement stables en été en particulier en bâtiment collectif d'habitation du fait de l'inertie, mais aussi d'une ventilation thermique d'été souvent faible en zones a et b.

7.4.4 Les températures maximales atteintes sont inférieures à la température maximale conventionnelle Tic

Les suivis du Cerema permettent d'établir la « journée chaude de référence » de la saison qui correspond à la troisième journée de la série des trois jours consécutifs présentant la température extérieure moyenne la plus élevée de la saison d'été. Le choix de cette journée se rapproche de la journée chaude de référence définie dans les règles Th-CE comme la journée dont la température moyenne n'est dépassée, en moyenne, que cinq jours par an.

La comparaison avec la Tic des valeurs obtenues en température intérieure durant les trois heures les plus chaudes de la journée chaude de référence montre que le calcul conventionnel RT conduit en général à des températures nettement plus élevées que dans la réalité. Certaines valeurs mesurées sont toutefois nettement au-dessus de la Tic, montrant que la gestion réelle est dans ces cas bien moins bonne que les conventions.

Illustration 209 – Comparaison entre la température maximale durant les jours les plus chauds et la température intérieure conventionnelle (règles Th-CE)



L'illustration 209 montre que les écarts constatés entre les Tic calculées et les Tic expérimentales sont en général accentués lorsque l'on corrige les valeurs calculées par la température extérieure moyenne mesurée. En effet, les séquences chaudes réelles retenues pour la Tic expérimentale présentent dans la plupart des cas des températures extérieures plus élevées que celles utilisées dans le calcul Th-CE.

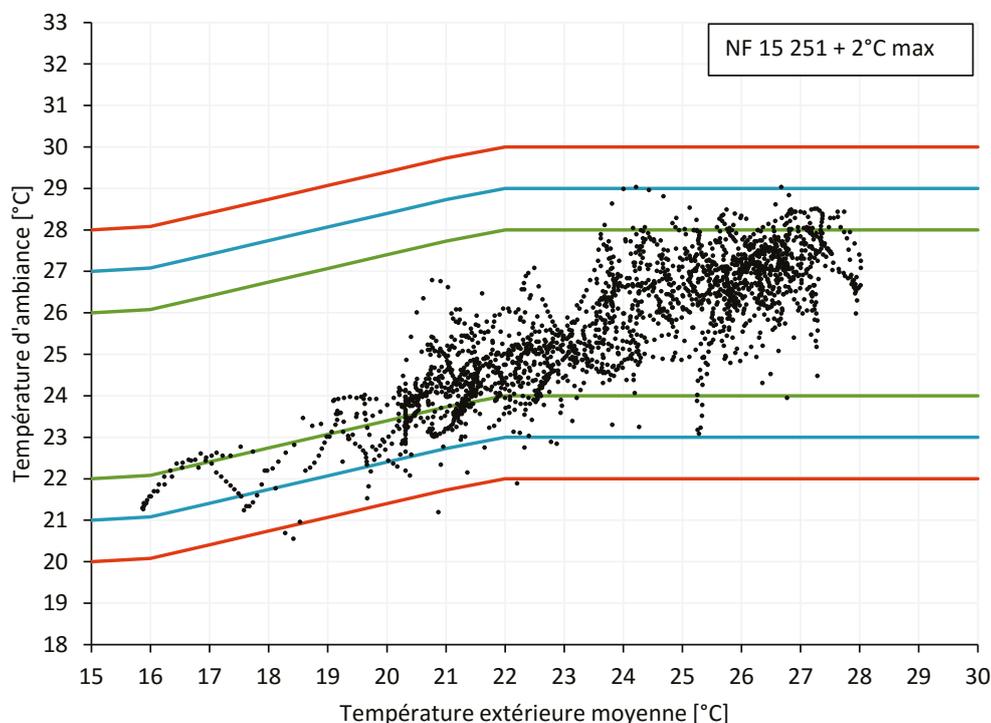
À retenir

L'indicateur de confort thermique d'été utilisé dans la réglementation thermique actuelle est difficilement vérifiable par la mesure. Les valeurs réelles les jours les plus chauds sont sensiblement différentes de la Tic. L'évolution vers un nouvel indicateur est souhaitable.

7.4.5 L'évaluation du confort thermique doit prendre en compte la rigueur climatique

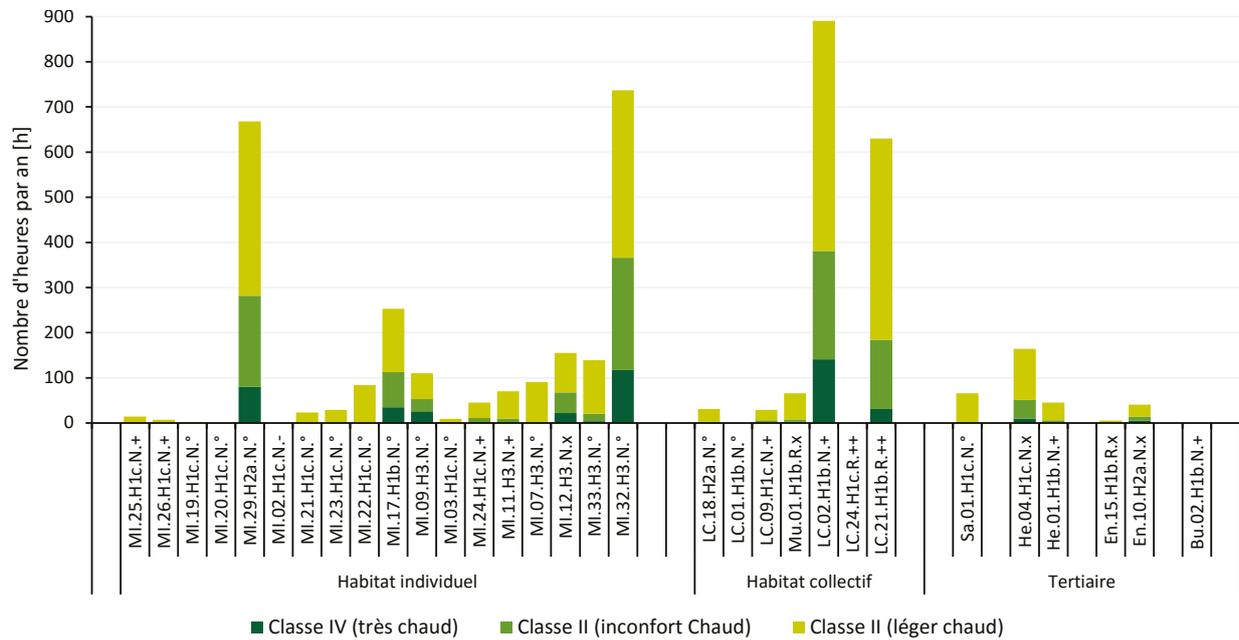
Les suivis Cerema comprennent le calcul du nombre d'heures d'inconfort selon la norme relative au confort adaptatif (EN NF 15251), pour tenir compte du phénomène d'**adaptation** des usagers aux conditions extérieures de la période météorologique vécue (adaptation de l'habillement, des activités). Cette adaptation conduit en effet à la prise en compte des conditions climatiques des journées précédentes pour apprécier le niveau de confort d'un espace non climatisé dans lequel il n'y a peu de contrainte vestimentaire. Il est important de considérer les conditions de température extérieure pour apprécier de manière relative le confort d'un bâtiment non climatisé. En effet, plus il fait chaud longtemps, plus les personnes s'habituent à une température élevée ; et plus la température extérieure est élevée durant les derniers jours, plus une température élevée est acceptée à l'intérieur des locaux. Cependant l'adaptation à une séquence chaude a été plafonnée à 2 °C, comme l'illustre la figure suivante : cette limitation à 2 °C est aussi celle retenue dans l'indicateur DIES pour le confort hors période de sommeil.

Illustration 210 – Plages de confort adaptatif avec plafonnement à 2 °C de l'adaptation à la température extérieure



L'application de cette démarche conduit à considérer les bâtiments BBC en zone méditerranéenne comme confortables en période de forte chaleur (sauf la maison individuelle MI.32.H3N), alors que certains bâtiments situés en zones a et b le sont moins avec des températures extérieures pourtant relativement plus clémentes.

Illustration 211 – Niveau d'inconfort thermique selon la norme EN NF 15251
avec plafonnement à 2 °C de l'adaptation à la température extérieure



À retenir

La norme EN NF 15251 permet une évaluation plus fine du confort thermique en saison chaude que le critère du nombre d'heures à plus de 28 °C. Les résultats obtenus apparaissent davantage en phase avec le ressenti des occupants.

7.4.6 Les pratiques de gestion thermique d'été sont culturelles

Dans l'échantillon considéré, les inconforts d'été sont plus fréquents (inconforts calculés mais aussi inconforts perçus par les occupants) dans la partie nord de la France. Cela peut sembler contre-intuitif, les températures estivales étant réputées plus modérées que dans la partie méditerranéenne. Une première hypothèse consiste à considérer que les plaintes des occupants sont plus nombreuses dans le Nord parce que leur niveau de tolérance à la chaleur est plus faible. En effet, le bien-être thermique, bien que dépendant de la température objective, est en partie déterminé par des paramètres aussi complexes que nombreux tels que l'âge et l'activité des occupants, les codes vestimentaires en vigueur dans les bâtiments tertiaires, l'ambiance lumineuse, le recours possible à une ventilation naturelle et la tolérance aux bruits extérieurs (ouverture de fenêtre), la capacité à trouver des alternatives pour atteindre un bon niveau de confort, la possibilité d'agir sur le système... Par exemple, on constate qu'en été, le niveau de tolérance aux températures élevées est bien meilleur que dans les bâtiments climatisés, dans lesquels le niveau d'attente est très différent.

L'observation nous amène à privilégier également la piste des compétences sociotechniques nécessaires à la gestion d'un bâtiment BBC par période de forte chaleur. Ainsi, les habitudes culturelles régionales sont plus ou moins favorables. Dans le Nord, il n'y a pas de réflexe de fermeture des volets et des fenêtres dès le milieu de matinée pour se préserver de la chaleur. Au contraire, on privilégie l'ouverture des fenêtres et des volets pour profiter de l'extérieur et de la lumière. La ventilation nocturne est en revanche peu pratiquée à cause des baisses de température assez fréquentes la nuit. Dans les bâtiments BBC, ces pratiques sont plus lourdes de conséquences que dans des bâtiments traditionnels.

À retenir

La gestion thermique d'un bâtiment BBC nécessite des compétences sociotechniques en particulier la pratique d'ouverture des fenêtres la nuit et la mise en place de protections solaires dans la journée, ce qui est acquis en zone méditerranéenne mais reste à généraliser sur l'ensemble du territoire.

7.4.7 Quelques enseignements sur le rafraîchissement par ventilation mécanique

Les suivis des bâtiments équipés de dispositifs de rafraîchissement par ventilation mécanique (puits thermiques, double flux avec bypass) nous renseignent sur leur mode de fonctionnement :

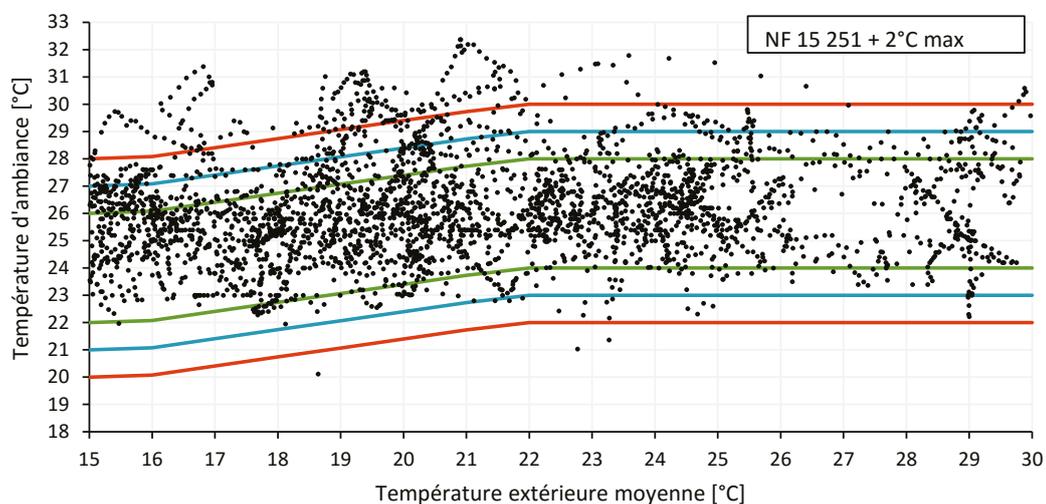
- les échangeurs des ventilations double flux doivent être neutralisés en période de ventilation nocturne (bypass de l'échangeur à plaque, arrêt de l'échangeur à roue) pour faciliter l'évacuation de la chaleur : une utilisation de l'échangeur est cependant possible lors des journées de forte chaleur sous réserve d'un asservissement précis et de débits strictement limités aux débits d'hygiène ;
- l'utilisation estivale des puits thermiques est contre-productive la nuit, par rapport à l'introduction directe de l'air extérieur, à lui préférer ;
- le rafraîchissement apporté par le fonctionnement nocturne de la ventilation mécanique, même à grands débits, est insuffisant pour compenser l'absence de ventilation naturelle par ouverture des fenêtres, car les débits sont très inférieurs à ceux résultant de l'ouverture des baies.

7.5 Confort thermique de mi-saison : certains bâtiments présentent des niveaux de température élevés

Les valeurs de température intérieure en mi-saison peuvent être parfois en dehors des plages de confort obtenues en application de la norme EN NF 15251. Ainsi sur les 52 bâtiments évalués, seuls 3 bâtiments montrent des signes d'inconfort thermique en mi-saison.

La maison individuelle MI.17.H1b.N située en zone b présente ponctuellement des températures intérieures de plus de 29 °C lorsque la température extérieure moyenne est inférieure à 20 °C sans que l'on ait pu expertiser avec certitude l'origine de cette défaillance.

Illustration 212 – Mise en valeur de températures excessives en mi-saison dans la maison MI.17.H1b.N



Cette tendance ressort également de l'exploitation des indicateurs. Les 18 retours d'opérations tertiaires ne mentionnent pas d'inconfort mais 5 opérations résidentielles, sur les 33 avec des données, témoignent d'un inconfort ou d'un confort variable en fonction des usagers. Néanmoins cet inconfort n'est apparemment pas suffisant, pour toutes les opérations, pour conduire à un investissement dans un dispositif d'appoint. Ces tendances doivent être considérées avec précaution car il est toujours difficile, pour un interviewé, de bien distinguer la mi-saison de la saison chaude et/ou de la saison froide.

L'analyse des données est cependant délicate car ces températures élevées en mi-saison peuvent résulter de facteurs très différents :

- installations de chauffage mal réglées : par exemple émetteurs de chauffage à forte inertie tel que les planchers chauffants associés à des régulations inadaptées ou mal réglées, pertes thermiques de réseaux de distribution de chauffage trop abondantes ;
- logement non chauffé en étage courant : si le logement est entouré de logements chauffés, les capacités d'évacuation des apports internes et solaires peuvent être insuffisantes en absence d'ouverture des fenêtres ;
- manque de protection contre le rayonnement solaire direct et diffus en particulier dans des espaces très vitrés ;
- stratégies de chauffage passif à haute température de la part des occupants pour économiser l'énergie de chauffage : pas d'occultation solaire, maintien des fenêtres fermées ;
- absence de gestion thermique d'été sauf en période de canicule ;
- absence d'occupation (pas de gestion thermique).

7.6 Inconfort thermique et difficultés de compréhension

Les parties précédentes, déclinées selon les saisons, montrent qu'on observe des **inconforts thermiques ressentis tout au long de l'année** et qui, si l'on met de côté les malfaçons, dysfonctionnements techniques et technologies non matures ainsi que les erreurs de conception, peuvent être liés à :

- des systèmes qui tout en étant techniquement recevables se révèlent partiellement inadaptés au **contexte d'utilisation future**. Les résultats des mesures au regard du confort physiologique peuvent être favorables alors que la réception du point de vue des occupants est négative, parfois très négative. On peut aussi observer de mauvaises performances énergétiques liées essentiellement aux usages : difficultés d'utilisation tout autant que volonté de neutraliser des systèmes soupçonnés de produire de l'inconfort, expliquent au moins en partie les mauvaises performances perçues, en particulier pour les systèmes, ou les sensations d'inconfort. L'exemple des ventilations double flux est sans doute emblématique de certaines difficultés à faire coïncider enjeux énergétiques et enjeux de qualité d'usage : augmentation du débit en journée l'été avec l'intention de rafraîchir les logements alors que cela fait rentrer davantage d'air chaud et, sans bypass, élève la température de l'air entrant. Avec la circulation d'air créée, les occupants pensent pourtant bien faire. Il s'y ajoute une méconnaissance de l'objectif premier de la ventilation (enjeu sanitaire) ;
- l'**intervention** non souhaitée des **occupants** ou leur absence de coopération active qui vient, en outre, faire obstacle à la performance énergétique du bâtiment.

Ces pratiques peuvent s'expliquer par un défaut de compréhension du fonctionnement du bâtiment. Par exemple, les **notions** d'apport ou de protection solaire, d'inertie et de ventilation restent **difficilement accessibles** pour un grand nombre de personnes et apparaissent comme compliquées à prendre en compte dans les pratiques quotidiennes (gestion des volets et des fenêtres), rendant laborieuses les tentatives de régulation thermique. On observe alors un ensemble de pratiques inadaptées : occultations limitant les apports solaires en hiver, ouverture prolongée des baies vitrées entraînant des déperditions de calories, ouverture des fenêtres en journée l'été induisant un inconfort thermique durable, mauvais réglage du thermostat d'ambiance...

En outre, les **habitudes socioculturelles** peuvent avoir un impact positif ou négatif sur les consommations et le niveau de confort. Les pratiques inadaptées observées sur certaines opérations peuvent être imputées à une absence de compétences et/ou à des habitudes culturelles contre-productives. Comme abordé au § 7.4.6, c'est par exemple ce qui peut expliquer les situations d'inconfort d'été observées dans la partie nord de la France, les habitants n'ayant pas, comme dans les régions du Sud, historiquement développé des stratégies pertinentes pour lutter contre les températures élevées :

- une **difficulté technique** à anticiper et gérer les apports de chaleur internes réels, en résidentiel comme en tertiaire ;
- un **manque de prise en compte du contexte externe**. On peut citer par exemple, le risque d'intrusion entraînant une absence de ventilation nocturne, ou des volets fermés en hiver en journée par souci de sécurité et/ou d'intimité, limitant les apports solaires.

7.7 Autres aspects de la qualité d'usage

En complément des autres thématiques déjà abordées, les indicateurs ont permis de questionner les opérations sur d'autres aspects de la qualité d'usage comme le confort acoustique, le confort lumineux ou la satisfaction vis-à-vis de l'accès à l'eau chaude sanitaire. Les tendances obtenues sont présentées ici. Comme précédemment, elles seront confirmées avec l'augmentation du panel.

Satisfaction globale concernant les logements

Des retours sur la satisfaction globale à vivre dans ces logements BBC ont pu être obtenus pour 33 opérations en résidentiel. Les indicateurs tendent à signifier que les occupants sont globalement plutôt satisfaits de leur logement (30 opérations sur 33) même si quelques opérations pourraient connaître des améliorations (3 opérations).

Un confort acoustique de bonne qualité

Au vu des résultats des indicateurs, le confort acoustique semble globalement de bonne qualité. Sur 34 opérations en résidentiel avec des retours, 27 semblent confortables. Il faut toutefois noter que, dans 3 cas, il existe une gêne due à des nuisances du voisinage direct et les occupants de 3 autres opérations se plaignent de nuisances en lien avec la présence de certains équipements, en particulier VMC.

Cette même tendance s'observe dans le tertiaire où 11 des 13 retours vont dans le sens d'un confort acoustique de bonne qualité.

Un confort lumineux de bonne qualité avec un accès à la lumière naturelle jugé suffisant

Des indicateurs renseignés ont été obtenus pour 32 opérations en résidentiel. Il ressort que les bâtiments sont plutôt agréables concernant l'accès à la lumière naturelle (27 opérations). Seule une minorité, soit 5 opérations, sont jugées plutôt inconfortables sur ce point. La lumière artificielle n'est que peu utilisée en journée, ce qui est cohérent avec les réponses précédentes.

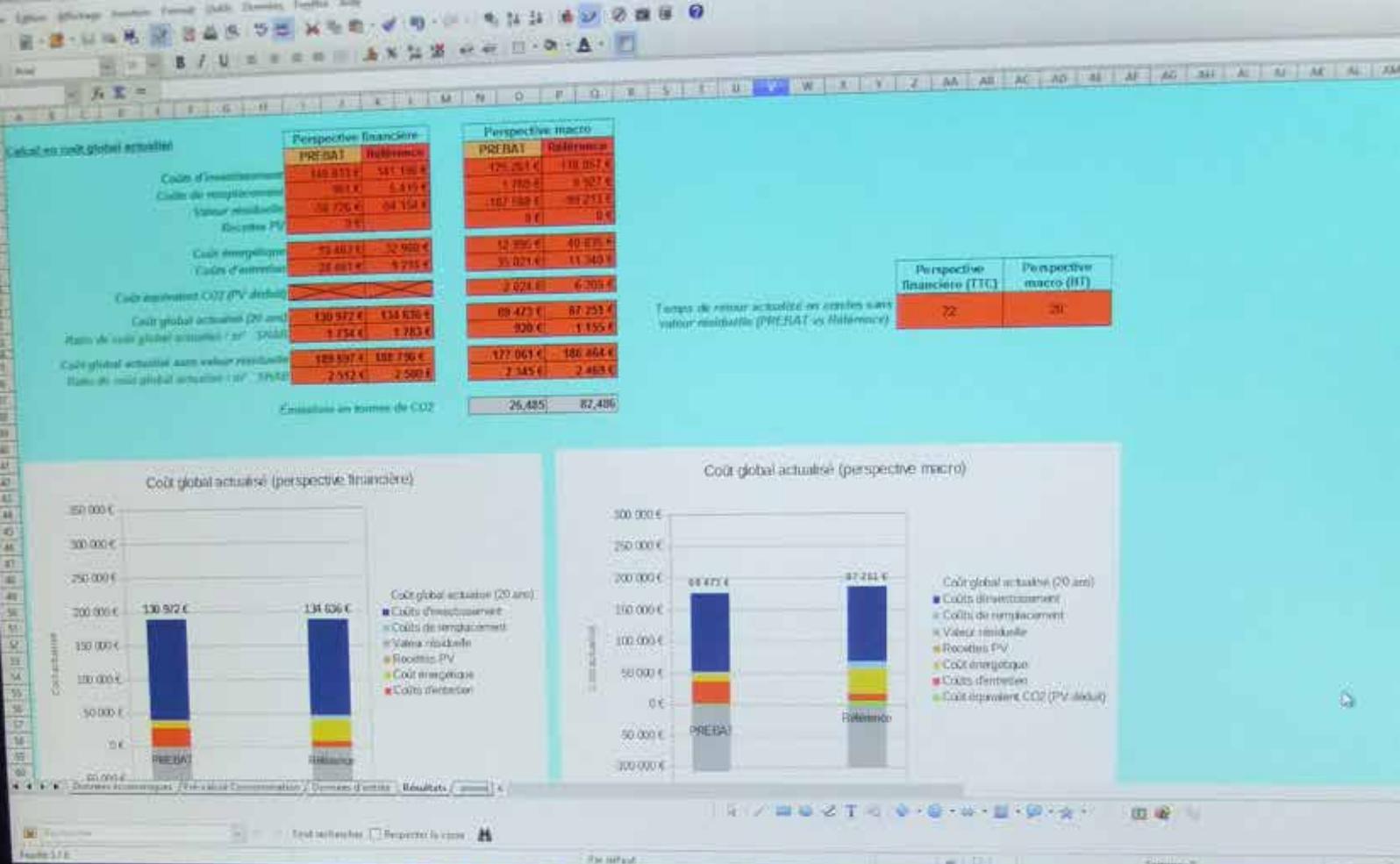
Le tertiaire présente sensiblement les mêmes tendances même si l'usage régulier de la lumière artificielle est plus fréquent. Les occupants de 14 opérations sur les 16 considérées se déclarent satisfaits par l'accès à la lumière naturelle, mais ce résultat est toutefois à nuancer dans la mesure où ces mêmes bâtiments font appel régulièrement à la lumière artificielle en journée.

Un accès à l'eau chaude sanitaire plutôt satisfaisant

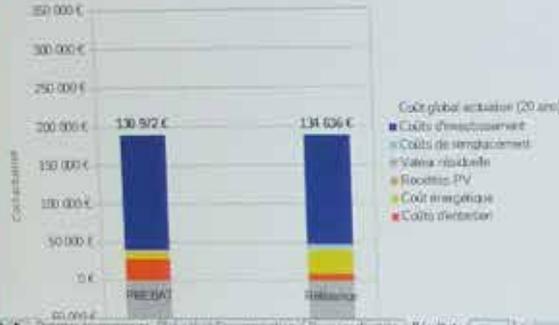
Le questionnement *via* les indicateurs a également permis d'interroger sur l'accès à l'eau chaude sanitaire.

Pour les bâtiments tertiaires, il s'agissait d'avoir des retours sur la pertinence de ces accès. Ainsi, sur les 18 témoignages recueillis, dans 14 cas les usagers sont globalement plutôt satisfaits de leur accès à l'ECS. Seuls 2 cas soulignent une insatisfaction forte sur cet usage, probablement en lien avec un dysfonctionnement de l'installation.

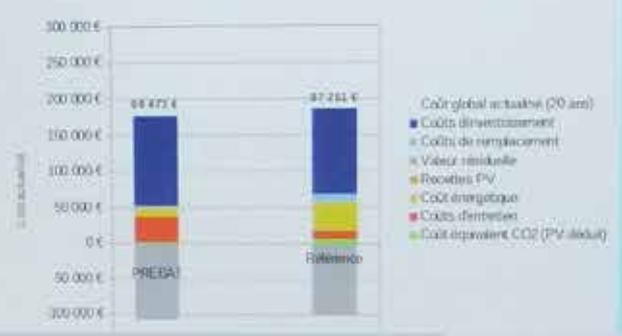
Pour les bâtiments résidentiels qui sont nécessairement équipés d'une installation de production d'ECS, les thématiques intéressantes étaient la satisfaction concernant la température de l'eau, du volume d'ECS disponible et du temps d'attente au point de puisage. Des résultats ont pu être obtenus pour 33 opérations. Une large majorité d'occupants témoignent d'un accès à l'ECS plutôt confortable (26 bâtiments). Un inconfort est signalé dans 7 cas et particulièrement souligné dans 5 cas. Cela est certainement en lien avec le temps d'attente pour obtenir de l'ECS car les résultats sont similaires : 28 retours positifs et 5 plaintes. Ainsi un temps d'attente trop important dégrade fortement la qualité d'usage du système.



Coût global actualisé (perspective financière)



Coût global actualisé (perspective macro)



DÉCOMPTÉ GÉNÉRAL DÉFINITIF

ES - Construction 99 Logements

	PRÉ-VISIBILITÉ		MARCHÉS SIGNÉS		DÉCOMPTÉ	ÉCART
	PRÉ-VISIBILITÉ	PRÉ-VISIBILITÉ	MARCHÉS SIGNÉS	MARCHÉS SIGNÉS		
		1 001 945,19 €				
PROCES BUDGÉTAIRES		288 840,27 €		302 460,56 €		11 620,29 €
MARCHÉS PRÉVISIONNELS		344 190,24 €		405 951,85 €		61 761,61 €
TRAVAUX		368 544,68 €		194 048,11 €		-174 496,57 €
		17 159,84 €		244 108,58 €		176 948,74 €
		135 860,54 €		131 880,33 €		-4 980,21 €
		143 573,14 €		11 640,20 €		-131 932,94 €
		30 300,89 €		44 807,10 €		14 506,21 €

L'essentiel

Les opérations PREBAT, soutenues par l'Ademe, visent à construire ou à rénover des bâtiments exemplaires énergétiquement par rapport à la RT 2005, et innovants par les solutions mises en œuvre par rapport aux solutions constructives dominantes sur la période 2005-2012.

Cette dynamique d'innovation a un impact financier dans la première étape de développement de nouvelles solutions en raison de l'aléa de mise en œuvre par les acteurs de la construction – liée à l'apprentissage de nouvelles techniques – et du coût des matériaux ou systèmes produits à petite échelle (en petit nombre). Les résultats économiques de l'étude sont donc à replacer dans un contexte d'appel à projet de bâtiments démonstrateurs, basé en partie sur des techniques innovantes ou peu mises en œuvre au moment de leur réalisation. Ces résultats ne doivent pas être comparés à une analyse économique de bâtiments RT 2012 récents qui auraient bénéficié, depuis, d'un effet d'apprentissage et/ou d'un effet d'échelle.

Au cours de cette première année de capitalisation économique, l'analyse s'attache dans un premier temps à faire ressortir des éléments de connaissance des coûts des opérations en fonction de leur performance, en identifiant les travaux les plus coûteux.

Il est raisonnablement attendu que, pour atteindre une performance énergétique supérieure, les opérations PREBAT nécessitent un effort d'investissement supplémentaire par rapport à une opération « classique » de la part des propriétaires immobiliers, occupants ou bailleurs publics et privés. Cependant, ce surcoût d'investissement pourrait être compensé en partie par la moindre consommation énergétique du bâtiment durant toute la période d'occupation. Cet argument économique pourrait amener les propriétaires immobiliers à consentir un effort financier initial plus conséquent en faveur de la transition énergétique et de la lutte contre le réchauffement climatique.

En ce sens, l'analyse financière vise également, au-delà de l'analyse des coûts d'investissement, à évaluer la rentabilité économique relative des opérations PREBAT à travers une analyse en coût global.

La méthode adoptée se fonde sur une approche comparative dans le temps, entre le bâtiment PREBAT et son équivalent théorique, à dimensions égales, répondant aux exigences minimales de la RT 2005.

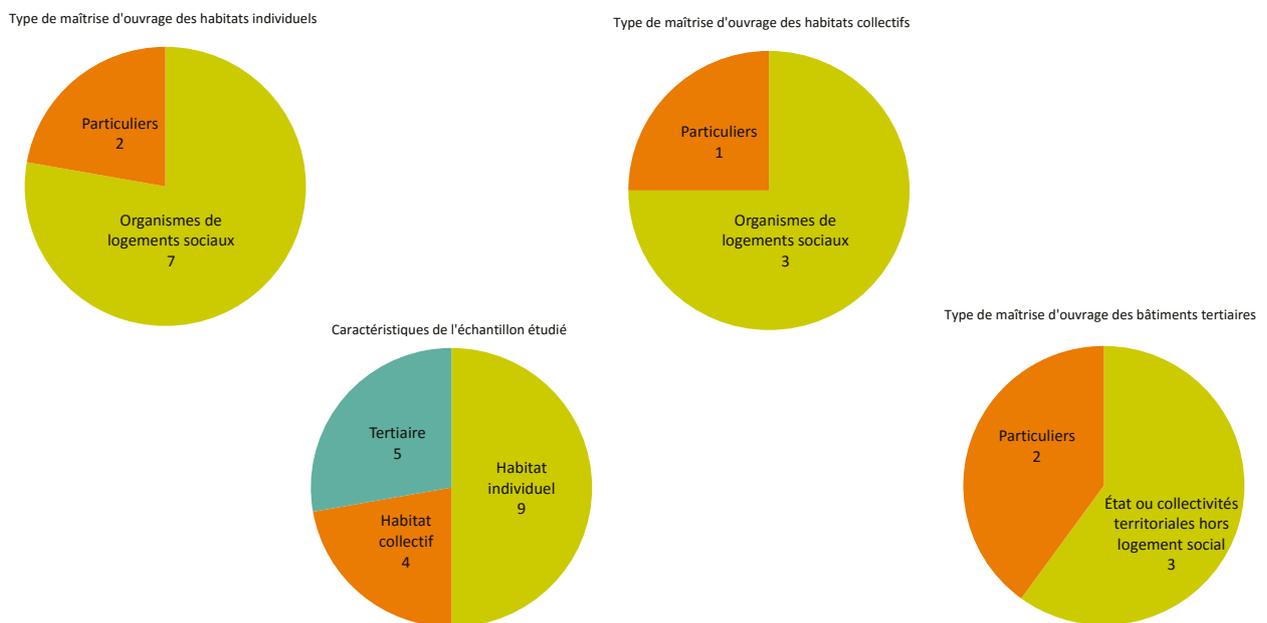
Pour cette année, la taille de l'échantillon ne permet pas d'extraire des résultats qui seraient représentatifs.

8.1 Échantillon de la capitalisation économique 2016

Sur 45 bâtiments engagés dans la démarche de capitalisation économique 2016, seulement 18 ont pu mobiliser l'ensemble des données nécessaires à une analyse en coût global. En effet, la méthode demande de mobiliser :

- le surcoût présenté dans le dossier de demande de subvention déposé auprès de l'Ademe ;
- et les coûts prévisionnels ou définitifs de travaux et d'études du projet PREBAT (Annexe A.7.1).

Illustration 213 – Caractérisation de l'échantillon étudié



Sur ces 18 bâtiments, deux ont été rénovés. Cependant, puisque ces bâtiments ont subi une rénovation très lourde ou un changement d'usage, on peut considérer qu'ils se rapprochent suffisamment d'opérations neuves pour être inclus dans l'échantillon et traités sans différenciation avec les bâtiments neufs.

Seuls trois bâtiments sont équipés d'une installation photovoltaïque (repérés par un « *PV » dans les graphiques).



La situation géographique de l'opération peut avoir une incidence sur les coûts d'investissement : des effets de marchés locaux peuvent entraîner des surcoûts ou des moins-values sur certains types de travaux d'une région à l'autre, par exemple du fait de la disponibilité de matériels à moindre coût (zones frontalières) ou de la popularité de certains travaux. Cependant, la relative petitesse de l'échantillon actuel ne permet pas de tirer de conclusions robustes de ce point de vue.

8.2 Analyse en coût global

8.2.1 Principe de l'approche en coût global

Le principe général de l'approche en coût global consiste à prendre en compte l'ensemble des coûts (et éventuellement des recettes, dans le cas d'un investissement locatif par exemple) liés à une opération sur la totalité de son cycle de vie, et non plus seulement les coûts engendrés par l'acte de construire.

L'investissement initial porte sur la construction livrée (en fonction de l'analyse voulue, il peut être limité aux coûts de construction ou à l'inverse comprendre les coûts fonciers, de commercialisation, de financement, etc.).

Les approches en coût global intègrent en outre au minimum les coûts de fonctionnement du bâtiment, qui sont différés par rapport au temps de la construction : gros entretien /maintenance et remplacement des systèmes, exploitation et dépenses liées à l'occupation.

Le cas échéant, les coûts de déconstruction du bâtiment doivent être également pris en compte. Dans le cas où le calcul est réalisé sur une période plus courte que la « durée de vie » réelle du bâtiment, suivant le type d'analyse menée, il peut être nécessaire d'en évaluer une « valeur résiduelle » (elle est parfois rapprochée du prix de revente du bâtiment).

La norme ISO/DIS 15686-5⁴² qui propose un cadrage et une méthode de calcul de l'approche en coût global définit deux notions :

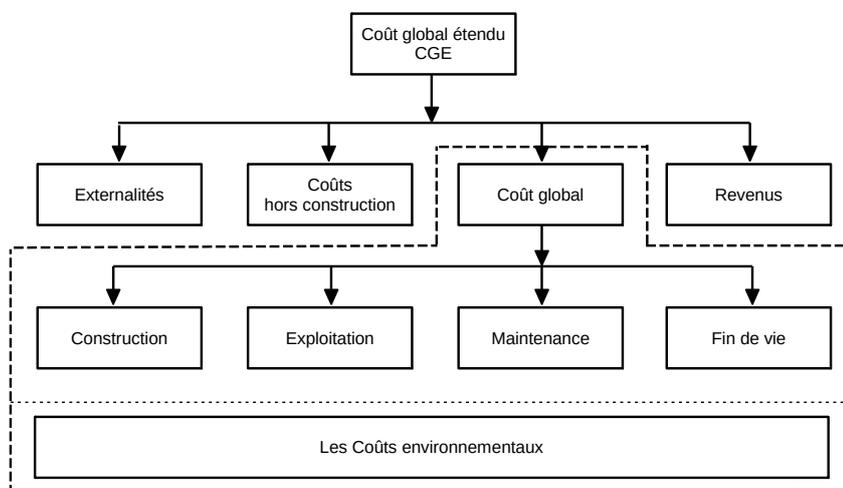
- le coût global direct :

$$\text{Coût global} = \text{Investissement} + \sum_{i=1}^N \frac{\text{Coûts énergétiques}}{(1+ae)^i} + \sum_{i=1}^N \frac{\text{Coûts entretien}}{(1+a)^i} + \sum_{i=1}^N \frac{\text{Coûts remplacement}}{(1+a)^i} - \frac{\text{Valeur résiduelle}}{(1+a)^N}$$

a étant le taux d'actualisation ;

- le coût global étendu dont le périmètre est plus large que le coût global direct (schéma ci-dessous). Il peut prendre en compte la dimension financière (financement, fiscalité), les coûts hors construction (impacts sur l'image, qualité d'usage...) et les externalités (impacts extérieurs au projet dont les conséquences économiques ne sont pas directement subies par le maître d'ouvrage, par exemple les impacts des émissions de CO₂ liées à la construction et à l'exploitation du bâtiment).

Illustration 214 – Périmètres du coût global étendu et du coût global, norme ISO 15686-5



42. Norme actuellement en révision.

Pour réaliser un calcul en coût global, seuls des flux monétaires exprimés à une même date peuvent être comparés et combinés. Le taux d'actualisation définit la valeur-temps de l'argent, c'est-à-dire qu'il permet de déterminer la valeur actuelle d'une dépense (ou d'une recette) qui aura lieu dans le futur.

Plus le taux d'actualisation est élevé, plus les coûts différés ont une valeur actuelle faible. Dit autrement, un taux d'actualisation élevé donne plus d'importance à la valeur de l'investissement (temps présent) qu'à celles des coûts différés. À l'inverse, un taux d'actualisation tendant vers zéro diminue l'écart entre dépenses (ou recettes) futures et actuelles, jusqu'à leur accorder la même importance.

À retenir

On comprend qu'il n'existe pas un coût global « type » mais qu'il s'agit plutôt d'une démarche de prise en compte de coûts différés dans le bilan d'une opération, à adapter en fonction de l'objectif de l'analyse et du point de vue adopté. Il est donc nécessaire d'en définir précisément le périmètre et les paramètres avant tout calcul.

Tout en respectant les grands principes de la norme ISO/DIS 15686-5 relative au coût global dans le bâtiment, le coût global calculé dans cette étude a donc été adapté aux objectifs du PREBAT.

8.2.2 Méthodologie adoptée pour l'analyse des bâtiments PREBAT

La méthode adoptée se fonde sur une approche comparative entre le bâtiment PREBAT et son équivalent théorique, à dimensions égales, répondant aux exigences minimales de la RT 2005. Une partie des analyses produites est donc présentée sous forme de « surcoût global » entre ce bâtiment de référence et le bâtiment PREBAT étudié.



Cette approche repose sur l'idée que la performance thermique se met en place majoritairement au travers du remplacement des solutions RT 2005 par des matériaux et des systèmes constructifs porteurs d'une performance énergétique supérieure. En réalité, les acteurs de la construction ne procèdent pas seulement par substitution mais par optimisation. Dit autrement, des arbitrages sont effectués en termes de surfaces, d'ambitions programmatiques du bâtiment (énergie, qualité de l'air, gamme des aménagements extérieurs, etc.), de taux d'intégration de matériaux ou d'équipements performants, dans l'objectif économique de parvenir à une évolution budgétaire correspondant aux moyens financiers de la maîtrise d'ouvrage.

Pour chaque bâtiment, deux approches en coût global ont été étudiées :

	Approche financière	Approche environnementale
Nature du coût global	Coût global direct	Coût global étendu
Taux d'actualisation	4 %	0 %
TVA	19,6 %	0 %
Prise en compte de l'externalité CO ₂	NON	OUI

L’**approche financière** en coût global traduit le point de vue d’un **investisseur qui sera occupant ou gestionnaire de son patrimoine** immobilier. Notons que l’approche financière d’un investisseur ni occupant ni gestionnaire porte essentiellement sur le coût d’investissement et non sur le coût global.

L’**approche environnementale** traduit un point de vue d’**intérêt général** (pouvoirs publics, société) dans une approche intergénérationnelle du projet et de ses effets (pas de préférence pour le présent). Les coûts pris en compte sont les coûts hors taxes⁴³.

Le périmètre du coût global étudié ici se limite aux éléments de la construction qui constitue plus particulièrement des leviers de la performance énergétique. Deux périodes de calcul ont été étudiées : 20 et 50 ans.

Pour l’approche financière, le coût global direct comprend :

- les coûts d’investissements du bâtiment hors foncier (coûts de la construction livrée et coûts des études, décomposition en macro-lots comme montré dans le tableau ci-dessous) ;

Clos et couvert	Charpentes/Ossature bois
	Gros œuvre/Maçonnerie/Fondations
	Couverture/Zinguerie/Étanchéité
	Menuiseries extérieures
	Façade/ITE/Bardage
Second œuvre	Cloisons/Plafonds/Doublage/ITE
	Serrurerie/Métallerie
	Revêtements de sols
	Menuiseries intérieures
Systèmes CVC, sanitaires et électriques	Faïence/Peinture
	Chauffage/Ventilation/Climatisation
	Plomberie/Sanitaire
	Électricité courants forts et faibles
Études	Photovoltaïque
	Études
Autres	Instrumentation PREBAT
	Ascenseur
	Autres (terrassement, VRD, ...)

- les coûts énergétiques des cinq usages de la réglementation thermique (chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage, refroidissement et auxiliaires) ;
- les coûts d’entretien des équipements techniques ou éléments du bâti impactant la performance énergétique du bâtiment ;
- les coûts de remplacement des équipements techniques ou éléments du bâti impactant la performance énergétique du bâtiment.

Pour l’approche environnementale, le coût global étendu comprend le coût global direct auquel est ajouté le coût d’une externalité : les émissions de gaz à effet de serre en phase d’exploitation (en équivalent CO₂).



Ne sont donc pas pris en compte ici le contenu CO₂ des matériaux de construction ni les émissions de GES liées à l’acte de construire en lui-même. Leur prise en compte peut bouleverser les résultats du calcul en coût global étendu, notamment en fonction des matériaux de structure choisis (bois/béton/acier).

43. Cf. le règlement délégué (UE) n° 244/2012 du 16/01/12 complétant la directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil sur la performance énergétique des bâtiments en établissant un cadre méthodologique comparatif de calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments et éléments de bâtiment.

Afin d'en évaluer le coût, nous utilisons la valorisation du CO₂ préconisée dans le rapport Quinet du Commissariat général à la stratégie et à la prospective de septembre 2013 (évaluation socioéconomique des investissements publics). Celui-ci constitue une référence méthodologique dans le domaine en France. Il fixe une valeur cible de 100 € la tonne de CO₂ en 2030.

Précision de la méthode et des hypothèses

Investissement et coûts différés⁴⁴

Les données utilisées pour réaliser l'analyse du coût d'investissement sont des coûts issus des factures ou des décomptes généraux définitifs pour 11 bâtiments, ou des coûts prévisionnels pour les autres bâtiments. Ils sont collectés et traités dans l'étude suivant la décomposition en macro-lots, comme montré dans le tableau ci-avant.

Le périmètre du coût global a été défini selon les documents disponibles lors du suivi des opérations :

- le coût des consommations porte sur les consommations mesurées corrigées par la variation du climat ;
- les coûts d'entretien n'ont pas été communiqués par les maîtres d'ouvrage, ils ont donc été **estimés** à partir d'un pourcentage du coût d'investissement comme le préconise la norme NF EN 15459 relative à la performance énergétique des bâtiments ;
- les coûts de remplacement sont les mêmes que les coûts d'investissement en considérant qu'on remplace à la fin de sa durée de vie un équipement ou un composant à l'identique. Les durées de vie sont issues de l'annexe 2 de la norme NF EN 15459 ;
- le coût des émissions de CO₂ est calculé à partir des émissions de CO₂ dues aux consommations énergétiques.



Aucune valeur résiduelle n'a été prise en compte dans les calculs, notamment face à la difficulté d'estimer la plus-value attendue par l'amélioration du confort et de la qualité sanitaire des bâtiments à haute performance énergétique étudiés.

Actualisation

La norme ISO/DIS 15686-5 préconise d'appliquer un taux d'actualisation compris entre 0 % et 4 %.

Dans l'approche financière, on ne peut pas négliger l'importance accordée au moment présent par l'investisseur, le taux d'actualisation appliqué est donc élevé, soit une valeur de 4 % telle que préconisée par le centre d'analyse stratégique⁴⁵ dans le rapport Alain Quinet publié en 2008⁴⁶ et par l'Union européenne.

Dans l'approche environnementale, le taux d'actualisation est de 0 % afin de refléter les avantages des investissements éco-énergétiques sur les moyen et le long termes.

Pour comprendre :

- avec un taux d'actualisation de 4 %, 1 € dans 30 ans vaut aujourd'hui 0,31 €. Le présent est fortement valorisé ;
- avec un taux d'actualisation de 0 %, 1 € dans 30 ans vaut aujourd'hui 1 €. Un poids égal est donné aux dépenses de la génération présente et aux dépenses des générations futures.



L'actualisation est un paramètre qui a une influence forte sur les résultats des calculs en coût global alors même qu'il est impossible d'en donner une valeur universelle : il dépend des « préférences » de chaque acteur considéré. Il convient donc de nuancer les conclusions si des tests de sensibilité n'ont pas été réalisés.

44. La méthodologie d'évaluation des coûts d'entretien et les durées de vie considérées pour chaque système énergétique sont détaillées en annexe.

45. Le centre d'analyse stratégique a été remplacé, le 22 avril 2013, par le Commissariat général à la stratégie et à la prospective, France Stratégie.

46. Les préconisations de France Stratégie ont évolué de 2008 à 2013 sur la composition du taux d'actualisation. En 2008, le taux d'actualisation préconisé était de 4 % sans prime de risque alors qu'en septembre 2013, un nouveau rapport préconisait un taux d'actualisation avec prime de risque systématique de 4,5 %. Le taux d'actualisation total a peu évolué.

Inflation

On suppose que tous les coûts subissent le même taux d'inflation sur toute la période de calcul, **hormis les coûts des différentes énergies**. On s'affranchit donc du taux d'inflation générale dans les calculs : les coûts d'entretien et de remplacement sont considérés comme identiques à chaque occurrence dans le temps (avant actualisation). Les taux d'inflation des énergies employés sont, eux, issus de moyennes d'évolutions constatées sur les dix dernières années⁴⁷, corrigées de l'inflation générale des prix observée à chacune de ces dates⁴⁸ (§ A.7.2).

Prise en compte de la TVA

Concernant la TVA, elle sera appliquée dans le cadre du calcul en coût global direct (aspect financier) au taux en vigueur à la réalisation des travaux soit 19.6 %. En revanche, pour le calcul en coût global étendu (aspect macroéconomique), elle peut être exclue afin de s'affranchir de ses fluctuations éventuelles et donc d'avoir des conclusions par opération ou par système indépendantes de la date d'investissement.

Durée de calcul

Pour chaque approche, les calculs sont faits sur deux durées :

- une durée longue de 50 ans, s'approchant de la durée de vie du bâtiment pendant laquelle des investissements lourds devront être réalisés (cette durée est plus particulièrement adaptée aux maîtres d'ouvrage publics) ;
- une durée plus courte de 20 ans, ne nécessitant pas *a priori* de nouveaux investissements importants et qui pourra plus particulièrement intéresser des investisseurs privés.

Le choix de la durée de calcul a un effet sur la période de prise en compte des consommations énergétiques, et donc du temps de retour sur investissement. Ainsi, **lorsqu'un surinvestissement se traduit par un gain énergétique faible, un plus grand nombre d'années sera nécessaire pour l'amortir**. Au contraire, plus le gain énergétique est important, plus les consommations énergétiques sont d'emblée une dépense évitée importante et plus le temps de retour sur investissement sera plus court.



Pour cette première capitalisation, les résultats obtenus pour chaque bâtiment ne doivent pas être comparés les uns aux autres car les coûts d'investissement ne sont pas ramenés à une même année de référence (euros constants). Pour réaliser ce type d'analyse, les coûts d'investissement devront être corrigés grâce à l'indice national du bâtiment BT 01.

47. Source : PEGASE.

48. Source : INSEE.

8.3 Le coût d'investissement

L'approche financière de l'investisseur porte essentiellement sur le coût d'investissement et non sur le coût global. L'analyse du coût d'investissement permet d'évaluer l'effort financier nécessaire à l'atteinte de performances énergétiques supérieures au niveau réglementaire.

8.3.1 Un effort financier supplémentaire à l'investissement

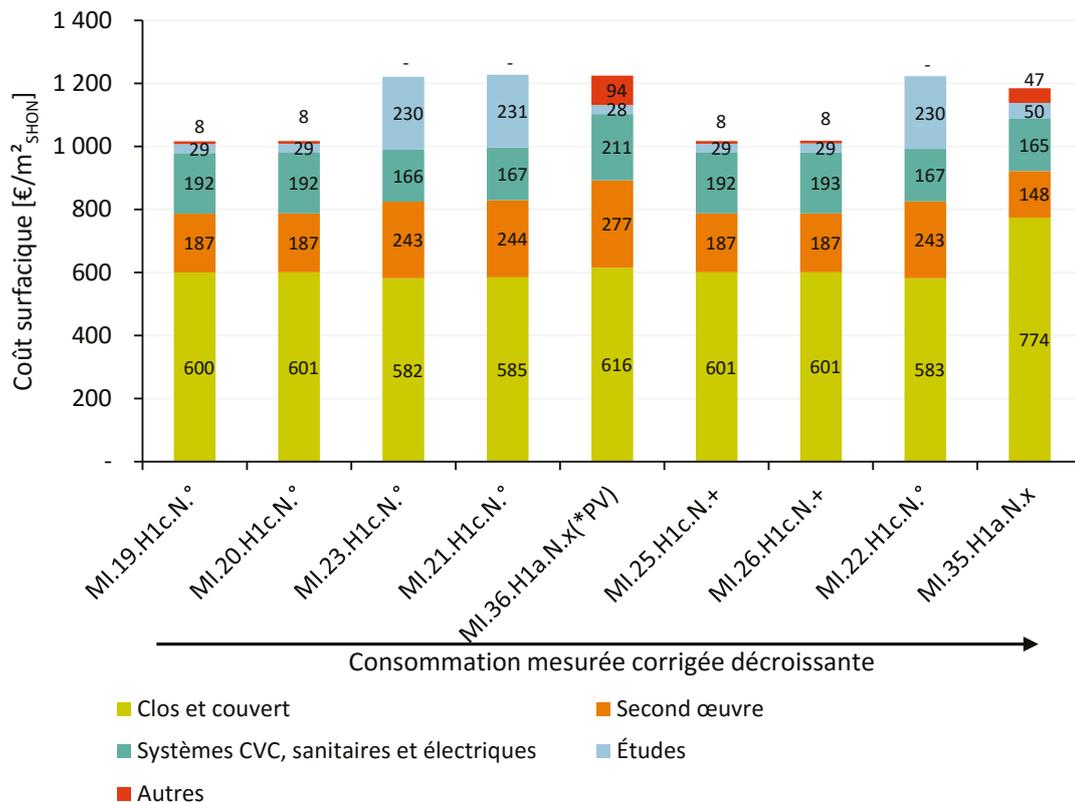
Dans notre analyse, afin de calculer l'investissement, les travaux pris en compte ne concernent que le bâtiment et le coût du foncier n'est pas inclus.

L'habitat individuel

Le coût d'investissement des maisons individuelles de notre échantillon est compris entre 1 016 et 1 228 €/m² (Illustration 215).

La faible dispersion du coût d'investissement des maisons individuelles nous permet de comparer sa moyenne avec le coût d'investissement moyen des bâtiments de référence RT 2005 : 1 128 €/m² pour les maisons individuelles PREBAT et 919 €/m² pour les maisons individuelles de référence (RT2005). Sur l'échantillon étudié (9 maisons individuelles), le surinvestissement moyen est de l'ordre de 200 à 220 €/m², soit un effort financier supplémentaire de l'ordre de 20 % à 25 %.

Illustration 215 - Représentation du coût d'investissement en €/m² pour l'habitat individuel



Sur le graphique, les bâtiments sont classés selon leur performance énergétique; les bâtiments les plus performants, soit ceux dont les consommations mesurées et corrigées selon le climat sont les plus faibles, sont à droite du graphique.

On peut observer que pour notre échantillon, les bâtiments les plus performants ne présentent pas un coût d'investissement plus élevé. En effet, d'autres paramètres influent sur le coût d'investissement, notamment :

- la localisation : les bâtiments se situent dans la même zone climatique H1 mais dans deux régions différentes, l'Auvergne (MI 19 à 23, 25, 26) et la Normandie;
- le nombre de niveaux : la maison MI.35.H1a.N.x est une maison de plain-pied alors que les autres maisons possèdent deux niveaux.

Ce graphique nous permet également d'analyser l'investissement par macro-lot. Le coût du macro-lot « clos et couvert » est relativement constant, compris dans une fourchette de 582 à 616 €HT/m², sauf pour l'opération MI.35.H1a.N.x dont le coût atteint 774 €HT/m². Ce surcoût pourrait s'expliquer par le type de menuiseries installé : la maison MI.35.H1a.N.x est équipée de menuiseries triple vitrage bois/alu alors que les autres maisons possèdent des menuiseries double vitrage bois ou PVC.

Concernant le macro-lot « second œuvre », on peut classer les bâtiments en deux groupes. Pour le premier groupe (MI.35, MI 19, 20, 25, 26), le coût du macro-lot « second œuvre » est moins élevé que pour les maisons du second groupe (MI.36, MI 21, 22, 23) à cause de la technique d'isolation employée : isolation par l'extérieur pour le premier groupe et isolation par l'intérieur pour le second groupe. En effet, les coûts d'une isolation par l'intérieur sont comptabilisés dans le macro-lot « second œuvre », alors que les coûts d'une isolation par l'extérieur sont comptabilisés dans le macro-lot « clos et couvert ».

Le coût du macro-lot « systèmes CVC, sanitaires et électriques » est compris entre 165 et 211 €HT/m². Le coût le plus élevé est observé quand la maison est équipée de panneaux photovoltaïques (MI.36), +15 % par rapport au coût moyen « systèmes CVC, sanitaires et électriques » de l'échantillon de maisons individuelles.

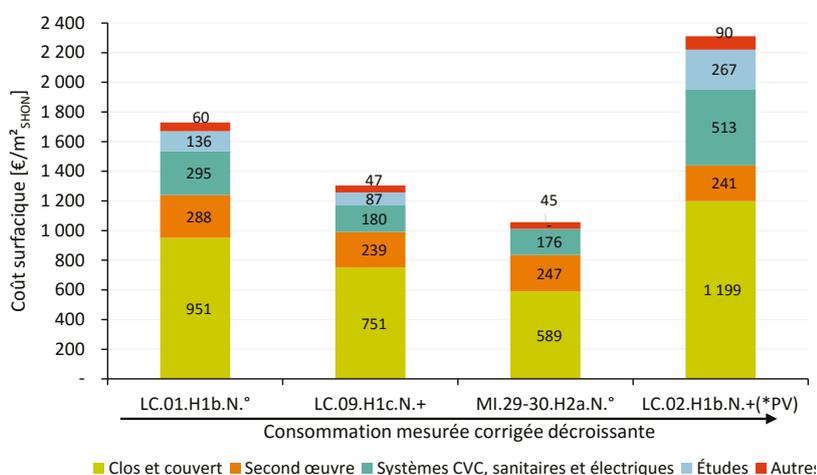
Le coût des études des maisons 21, 22 et 23 (appartenant à la même opération) est 5 à 8 fois plus élevé par rapport aux autres bâtiments. Ceci peut s'expliquer, pour partie au moins, par la comptabilisation dans le lot « études » pour cette opération des honoraires de la conduite d'opération ainsi que des intérêts bancaires supportés par la maîtrise d'ouvrage. En déduisant les honoraires de conduite d'opération et les intérêts bancaires, le coût du lot « études » s'élève à 50 €HT/m², ce qui est dans le même ordre de grandeur que celui des autres opérations.

L'habitat collectif

Le coût d'investissement des immeubles collectifs est très variable, de 1 057 €HT/m² à 2 311 € HT/m² (Illustration 216).

À titre de repère, le coût de construction moyen de l'habitat collectif s'élève à 1 090 €HT/m²⁴⁹ sur la période 2010 à 2014 (bâtiments soumis à la réglementation thermique 2005).

Illustration 216 – Représentation du coût d'investissement en €/m² pour l'habitat collectif



49. Ce coût est issu de l'étude « Un habitat plus compact et moins énérgivore : pour quels coûts de construction ? » réalisée par le Commissariat général au développement durable en décembre 2015.

Illustration 217 – Bâtiment MI.29-30



Le bâtiment MI.29-30.H2a.N.° est un bâtiment de deux logements en bande. Pour l'analyse économique, il est classé dans l'habitat collectif puisque les coûts ont été recueillis pour l'ensemble du bâtiment.

Le coût d'investissement des immeubles collectifs est très dispersé. Il n'est pas judicieux d'essayer d'en exploiter la valeur moyenne.

Cette forte dispersion du coût peut s'expliquer par plusieurs raisons.

La typologie de l'habitat collectif

L'immeuble MI.29-30 est un petit collectif comprenant deux logements (339 m²) alors que les trois autres immeubles comportent au moins quatre niveaux avec une surface allant de 1 599 à 5 403 m²; cela implique des contraintes différentes selon les projets (structure, fondations...) entraînant une forte variation du coût du macro-lot « clos et couvert ».

Des choix techniques différents

- des stratégies d'isolation différentes: la résidence (09) a adopté une stratégie d'isolation en insistant sur l'enveloppe, les usages et le confort sans toutefois investir fortement dans les systèmes (VMC...). L'opération (01) est dotée d'une isolation par l'extérieur ambitieuse visant particulièrement la suppression des ponts thermiques (balcons);
- le recours aux énergies renouvelables: la résidence (02) est exemplaire au titre des énergies renouvelables, s'équipant en ECS solaire, avec une production électrique photovoltaïque, en plus d'une VMC double flux et de systèmes d'éclairage économes.

La typologie de la maîtrise d'ouvrage

Trois des quatre résidences ont comme maître d'ouvrage un organisme de logements sociaux: public (01 et 09) ou privé (02). L'opération MI.29-30 a été construite par un promoteur privé, dans le cadre d'un montage en vente en état futur d'achèvement pour un bailleur social public.

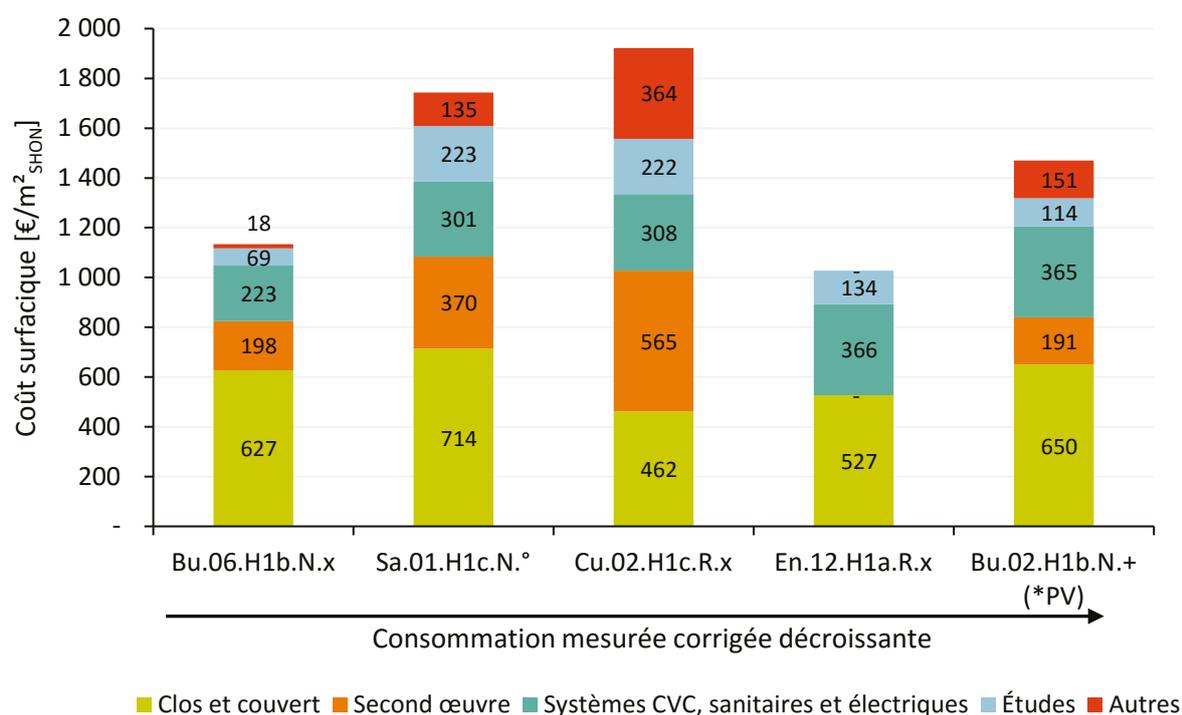
Le tertiaire

Les bâtiments tertiaires PREBAT étudiés recouvrent un groupe scolaire, une médiathèque, une maison médicale et deux bâtiments de bureaux qui se caractérisent par des usages très différents. En corollaire, le coût d'investissement des bâtiments tertiaires de l'échantillon présenté varie de 1 027 à 1 922 €HT/m² (Illustration 218).

À titre de repère, le coût de construction moyen de bureaux (hors honoraires) s'élève à 1 133 €HT/m² ⁵⁰ en 2008.

50. Ce coût est issu de l'étude « Le prix de construction des bâtiments non résidentiels autorisés en 2008 » réalisée par les cellules économiques régionales de Bretagne et Pays-de-la-Loire en septembre 2009.

Illustration 218 – Représentation du coût d'investissement en €/m² pour le tertiaire



On peut remarquer qu'il n'y a pas de corrélation entre la performance énergétique et le coût d'investissement des bâtiments de notre échantillon (Illustration 218).

La taille de l'échantillon ne permet pas une analyse par typologie de tertiaire qui serait plus pertinente, seuls les deux bâtiments de bureaux peuvent être comparés. Pour ces deux bâtiments, la maîtrise d'ouvrage est privée: dans l'un des cas, l'investisseur (concerné par la transition énergétique) occupe le bâtiment (Bu 02), l'autre est mis en location par un investisseur en immobilier de bureaux (Bu 06). On peut relever des stratégies différentes correspondant aux enjeux de chacun:

- L'investisseur en immobilier de bureaux recherche la rentabilité de son investissement (grâce aux loyers perçus). On peut imaginer qu'il attache donc de l'importance à la maîtrise des coûts de construction et à la qualité d'usage (pour éviter la vacance des locaux): il investit sur un éclairage performant et des peintures améliorant la qualité de l'air, éléments qui sont autant d'atouts pour les futurs locataires occupants. En définitive, l'investisseur en immobilier de bureaux optimise son temps de retour sur investissement en « dosant » ses efforts sur les systèmes tout en ayant des ambitions BBC remarquables;
- L'investisseur-occupant a consenti un investissement au mètre carré d'emblée plus significatif (en particulier l'installation photovoltaïque). L'analyse en coût global permettra de vérifier si les économies réalisées au niveau du fonctionnement compensent financièrement cet effort. Grâce au graphique de l'illustration 218, on peut déjà voir que l'investissement plus important permet de garantir des consommations énergétiques plus faibles.

Le coût d'investissement pour les éléments de « clos et couvert » varie de 50 % entre les différents bâtiments PREBAT. Ceci peut s'expliquer par la mise en œuvre d'une toiture végétalisée qui contribue aussi à la gestion des eaux pluviales ou de fondations spécifiques (bâtiment Sa 01). En revanche, ces variations ne semblent pas être expliquées par des contraintes climatiques qui auraient pu contribuer à renchérir le coût des investissements à réaliser pour répondre aux réglementations thermiques applicables en conséquence: les cinq bâtiments sont situés dans la même zone climatique H1.

Sur le poste « second œuvre », les écarts s'expliquent principalement par une isolation par l'intérieur (bâtiments Sa 01 et Cu 02), comptabilisée dans ce lot tandis qu'une isolation par l'extérieur est comptabilisée dans le macro-lot « clos et couvert ». L'opération En 12 ne comporte pas de macro-lot « second œuvre » car il s'agit d'une réhabilitation lourde qui n'a concerné que le bâti et les équipements.

À retenir

Le coût d'investissement des maisons individuelles de notre échantillon est compris entre 1 016 et 1 228 €/HT/m². Le surinvestissement moyen est de l'ordre de 200 à 220 €/HT/m², soit un effort financier de l'ordre de 20 % à 25 %.

Le coût d'investissement des immeubles collectifs est très variable: de 1 057 €/HT/m² à 2 311 €/HT/m².

Le coût d'investissement des bâtiments tertiaires de l'échantillon présenté varie de 1 027 €/HT/m² à 1 922 €/HT/m².

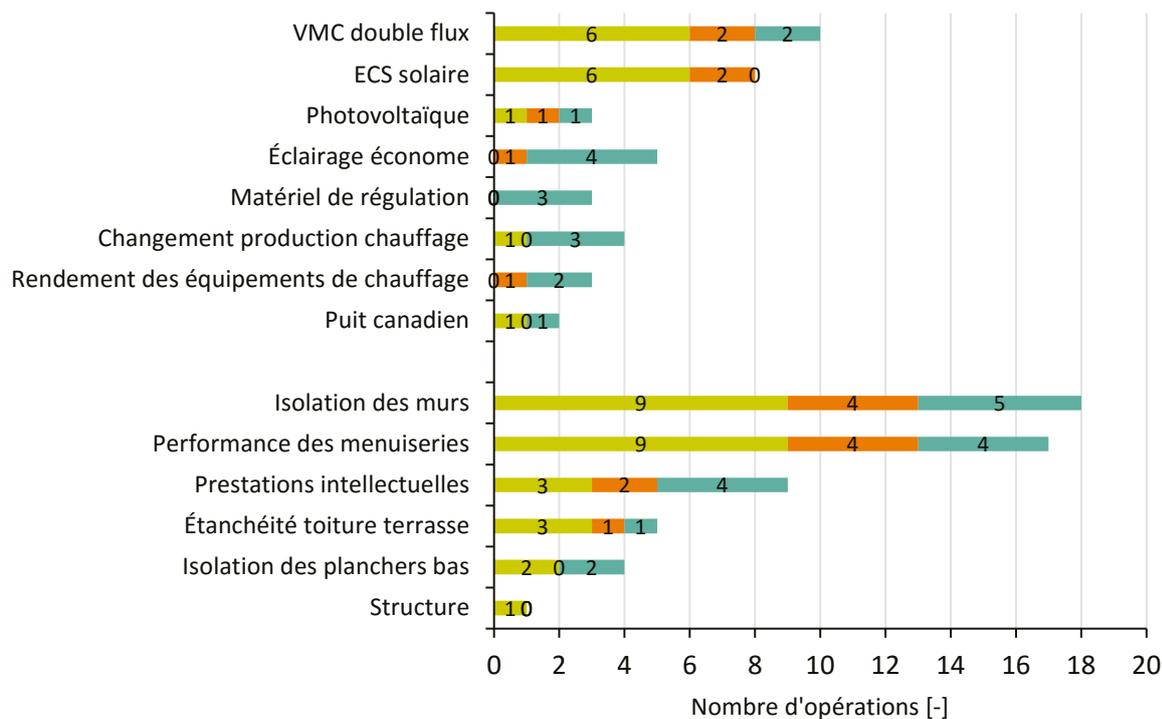
Sur l'échantillon, il n'y a pas de corrélation directe entre les consommations énergétiques et le coût d'investissement des projets.

Pour l'habitat collectif et le tertiaire, la taille de l'échantillon ainsi que la dispersion des données ne permettent pas de calculer de coût moyen et ainsi de conclure sur d'éventuels surcoûts.

8.3.2 Des leviers d'action variables selon les typologies

Pour chaque opération, nous avons identifié les leviers d'action permettant d'atteindre la performance énergétique PREBAT (Illustration 219).

Illustration 219 – Identification des leviers d'action des bâtiments PREBAT



Ce graphique représente les occurrences de leviers d'action employés pour chaque typologie. Par exemple, sur l'ensemble des maisons individuelles, 6 cas sont déclarés comme ayant leur performance énergétique du bâtiment améliorée grâce à l'installation d'une VMC double flux.

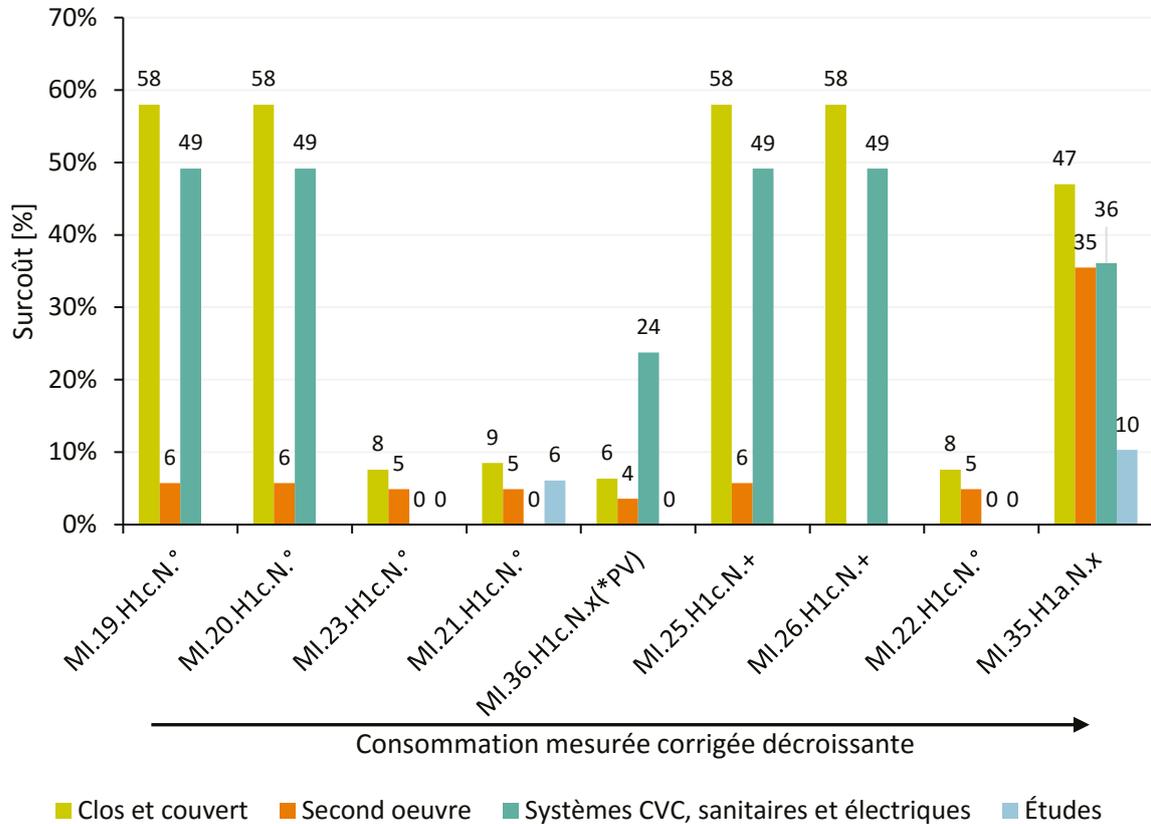
Outre le nombre de leviers d'action, notre analyse a permis d'étudier le surcoût (en %) par macro-lot.



Le surinvestissement a été calculé à partir des surcoûts par lot annoncés par le maître d'ouvrage ou à partir des estimations du suiveur.

L'habitat individuel

Illustration 220 – Surcoût d'investissement par macro-lot pour l'habitat individuel



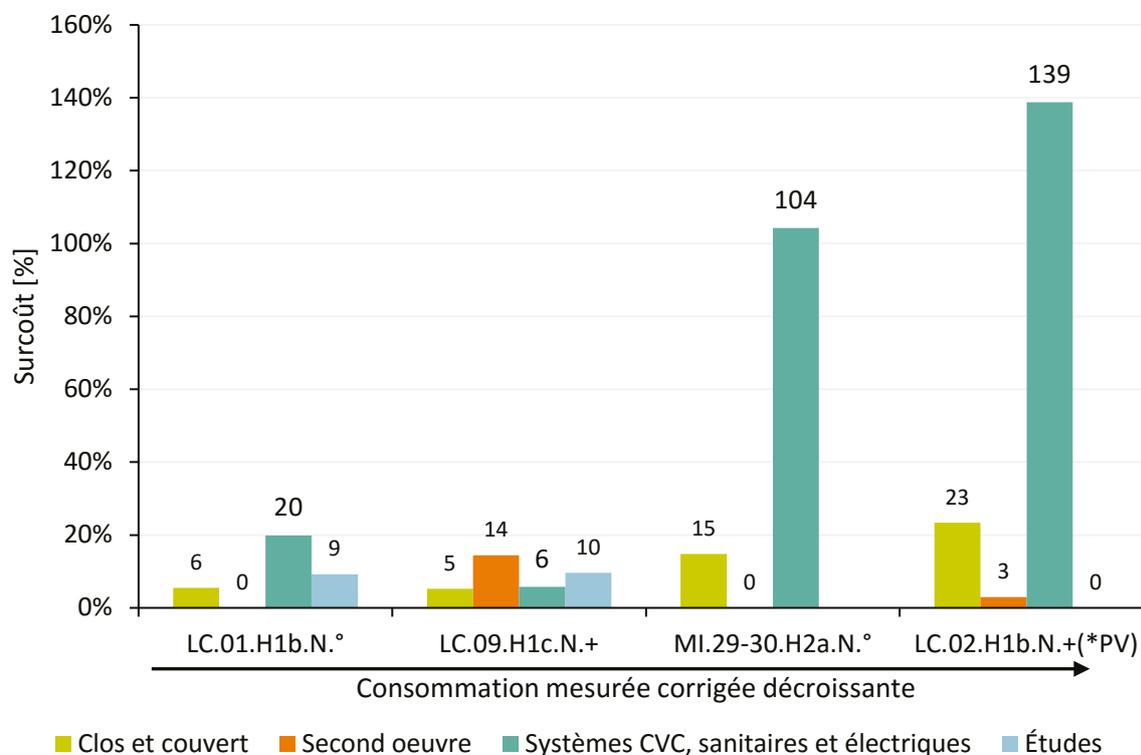
Pour les maisons individuelles, le surcoût sur les macro-lots « clos et couvert » est très variable selon les bâtiments, de 8 % à 58 % (Illustration 220), soit de 37 €/HT/m² à 247 €/HT/m². Le surcoût du « clos et couvert » est causé majoritairement par une amélioration de la performance des menuiseries et l'isolation des murs quand il s'agit d'une isolation par l'extérieur (Illustration 219).

Le surcoût sur le macro-lot « second œuvre » est faible, environ 5 % (environ 10 €/HT/m²), excepté pour une maison individuelle où l'isolation intérieure a été renforcée (MI 35, 39 €/HT/m²).

Le surcoût sur le macro-lot « systèmes CVC, sanitaires et électriques » est élevé: de 24 % à 49 % par rapport au bâtiment de référence, soit de 40 €/HT/m² à 63 €/HT/m². La performance énergétique est renforcée pour toutes les maisons individuelles par le recours à une ventilation double flux et une installation d'ECS solaire.

L'habitat collectif

Illustration 221 – Surcoût d'investissement par macro-lot pour l'habitat collectif



Concernant les immeubles collectifs, on observe un surcoût sur les systèmes CVC, sanitaires et électriques très important : plus de 100 % dans deux cas, soit jusqu'à 298 €/HT/m² (Illustration 221).

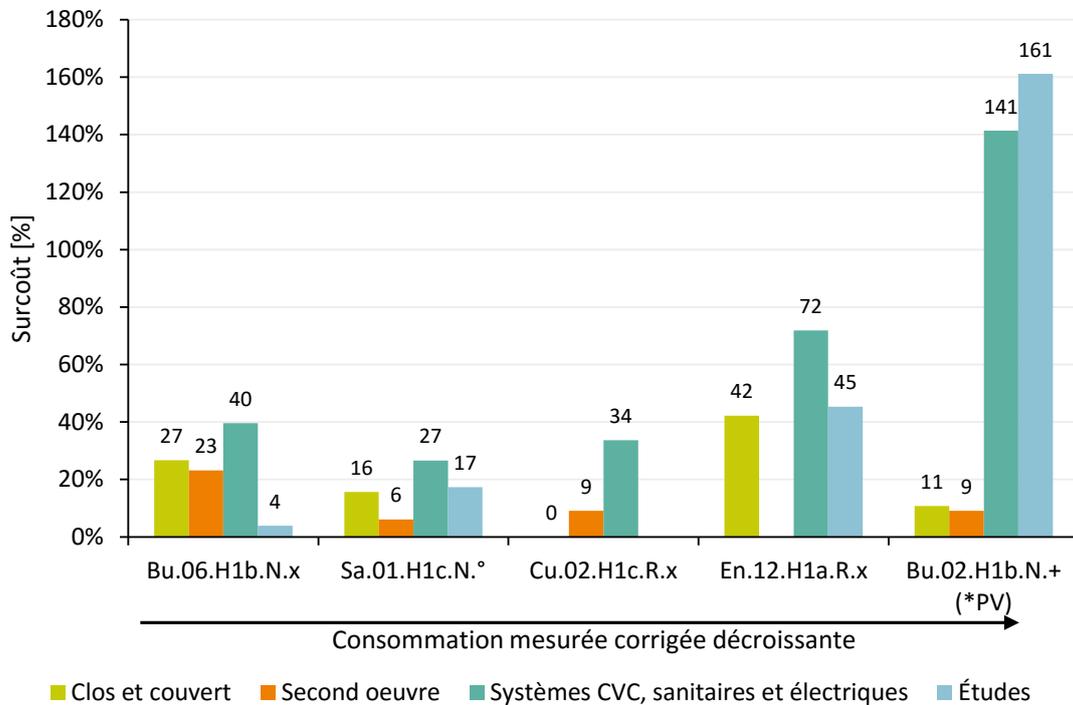
Les bâtiments ayant une meilleure performance énergétique présentent des surcoûts plus importants.

Le surcoût du macro-lot « systèmes CVC, sanitaires et électriques » est lié majoritairement à l'installation de VMC double flux et de chauffe-eau solaire.

Pour le bâtiment LC 02, le surcoût de l'installation de panneaux photovoltaïques représente 45 % du surcoût total, soit 218 €/HT/m².

Le tertiaire

Illustration 222 – Surcoût d’investissement par macro-lot pour le tertiaire



Pour les bâtiments tertiaires, des surcoûts très importants – de 27 % à 141 % – sont observés sur chacun des lots pour tous les bâtiments (Illustration 222). Les bâtiments tertiaires ayant une meilleure performance énergétique présentent des surcoûts plus importants.

Les surcoûts identifiés dans les autres typologies se retrouvent dans le tertiaire. On peut cependant remarquer des leviers d’action supplémentaires spécifiques comme la régulation, l’éclairage économe et les prestations intellectuelles.

À retenir

Pour l’habitat individuel, les surcoûts portent sur l’enveloppe et les équipements alors que pour l’habitat collectif et le tertiaire, les surcoûts sont observés majoritairement sur les équipements.

Pour le tertiaire, des leviers d’action spécifiques sont constatés comme la régulation, l’éclairage économe et les prestations intellectuelles.

Pour le tertiaire et l’habitat collectif, les bâtiments ayant une meilleure performance énergétique présentent des surcoûts plus importants.

8.4 Le coût global

L'approche en coût global permet de prendre en compte les coûts différés d'un projet et ainsi de déterminer le coût total du projet à moyen ou long terme. Elle permet notamment de prendre en compte les économies futures pour le porteur de projet, réalisées grâce aux investissements d'aujourd'hui.

L'objectif de cette démarche est de savoir si les surinvestissements PREBAT à la construction sont compensés par les gains sur les coûts différés (coûts énergétiques, coûts d'entretien, coûts de remplacement et externalités).

Paramètres de nos deux approches:

- approche financière: taux d'actualisation = 4 %, TVA = 19,6 %, externalité CO₂ non prise en compte;
- approche environnementale: taux d'actualisation = 0 %, TVA = 0 %, externalité CO₂ prise en compte.

L'habitat individuel

Illustration 223 – Représentation du coût global (en €/m²) pour l'habitat individuel

	Approche financière				Approche environnementale			
	20 ANS		50 ANS		20 ANS		50 ANS	
	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE
Médiane	1 715 €	1 416 €	2 014 €	1 813 €	1 580 €	1 417 €	2 639 €	3 518 €
Minimum	1 517 €	1 097 €	1 756 €	1 434 €	1 479 €	1 102 €	2 306 €	2 402 €
Maximum	1 891 €	2 032 €	2 308 €	2 865 €	1 811 €	2 035 €	3 199 €	4 911 €

En perspective financière, le coût global de l'habitat individuel varie de:

- 1 517 €TTC/m² (bâtiment MI 26.H1c.N.+) à 1 891 €TTC/m² (bâtiment MI.36.H1c.N.x(*PV)) sur 20 ans;
- 1 796 €TTC/m² (bâtiment MI 26.H1c.N.+) à 2 308 €TTC/m² (bâtiment MI.36.H1c.N.x(*PV)) sur 50 ans.

En perspective environnementale, le coût global de l'habitat individuel varie de:

- 1 479 €HT/m² à 1 811 €HT/m² sur 20 ans;
- 2 338 €HT/m² à 3 199 €HT/m² sur 50 ans.

La prise en compte des coûts différés ne modifie pas la hiérarchisation des bâtiments: le bâtiment ayant le coût d'investissement le plus bas a également le coût global le plus bas, le bâtiment ayant le coût d'investissement le plus élevé a le coût global le plus élevé. Ceci s'explique principalement par l'importance du coût d'investissement qui reste prépondérant vis-à-vis des coûts différés: sur 20 ans, il représente environ 80 % du coût global en perspective financière et environ 73 % en perspective environnementale.

L'habitat collectif

Illustration 224 – Représentation du coût global (en €/m²) pour l'habitat collectif

	Approche financière				Approche environnementale			
	20 ANS		50 ANS		20 ANS		50 ANS	
	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE
Médiane	2 047 €	1 984 €	2 280 €	2 308 €	1 849 €	1 840 €	2 690 €	3 086 €
Minimum	1 375 €	1 425 €	1 467 €	1 743 €	1 196 €	1 329 €	1 489 €	2 327 €
Maximum	3 037 €	2 699 €	3 376 €	3 253 €	2 638 €	2 524 €	3 758 €	4 474 €

En perspective financière, le coût global de l'habitat collectif varie de :

- 1 375 €TTC/m² à 3 037 €TTC/m² sur 20 ans ;
- 1 467 €TTC/m² à 3 376 €TTC/m² sur 50 ans.

En perspective environnementale, le coût global de l'habitat collectif varie de :

- 1 196 €HT/m² à 2 638 €HT/m² sur 20 ans ;
- 1 489 €HT/m² à 3 758 €HT/m² sur 50 ans.

Tout comme le coût d'investissement, le coût global de l'habitat collectif est très variable.

Le tertiaire

Illustration 225 – Représentation du coût global (en €/m²) pour le tertiaire

	Approche financière				Approche environnementale			
	20 ANS		50 ANS		20 ANS		50 ANS	
	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE	PREBAT	RÉFÉRENCE
Médiane	1 828 €	1 570 €	2 002 €	1 873 €	1 540 €	1 425 €	2 344 €	2 448 €
Minimum	1 353 €	1 073 €	1 489 €	1 397 €	1 191 €	1 067 €	1 722 €	2 119 €
Maximum	2 651 €	2 447 €	2 930 €	2 697 €	2 374 €	2 171 €	3 219 €	2 928 €

En perspective financière, le coût global en tertiaire varie de :

- 1 353 €TTC/m² à 2 651 €TTC/m² sur 20 ans ;
- 1 489 €TTC/m² à 2 930 €TTC/m² sur 50 ans.

En perspective environnementale, le coût global en tertiaire varie de :

- 1 191 €HT/m² à 2 374 €HT/m² sur 20 ans ;
- 1 722 €HT/m² à 3 219 €HT/m² sur 50 ans.

Quelle que soit la typologie de bâtiment, le coût global en perspective environnementale est moins élevé qu'en perspective financière. En effet, en approche environnementale, un poids égal est donné aux dépenses de la génération présente et à celles des générations futures (taux d'actualisation = 0 %) et la TVA n'est pas prise en compte. De plus, la prise en compte des émissions de CO₂ ne modifie que marginalement le coût global des projets. Dans la méthode appliquée, ne sont prises en compte que les émissions de CO₂ dues aux consommations d'énergie. La prise en compte du contenu CO₂ des produits de la construction pourrait peser davantage sur le coût global.



Ci-avant et dans toute la suite, notre approche n'intègre pas la valeur résiduelle du bâtiment, qui peut être assimilée à la valeur de revente du bien. Or les bâtiments de meilleure performance environnementale, comme les bâtiments PREBAT, semblent posséder une valeur de marché additionnelle (valeur verte) comme le montrent plusieurs études menées dans divers pays⁵¹.

- pour le résidentiel: + 5 à 30 % pour la rénovation ;
+ 2,8 à 8 % pour le neuf ;
- pour le tertiaire: + 4,5 à 35 %.

Cette valeur est non négligeable et donc à même de modifier les conclusions sur la rentabilité des bâtiments à basse consommation d'énergie.

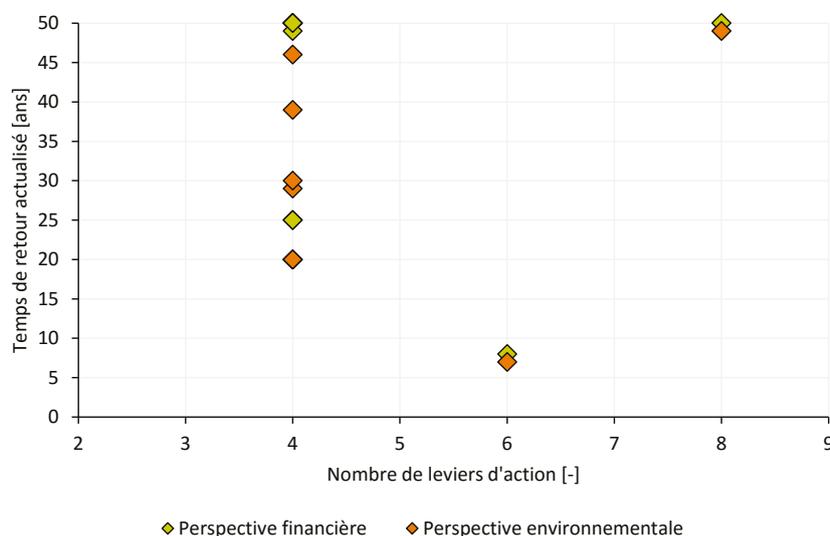
Un indicateur associé au coût global: le temps de retour actualisé

Le temps de retour actualisé a été calculé pour chaque bâtiment de notre échantillon. Il s'agit du nombre d'années nécessaires pour que les économies annuelles cumulées équilibrent l'investissement, soit encore la durée au bout de laquelle le coût global actualisé du bâtiment PREBAT devient inférieur au coût global actualisé du bâtiment de référence.

En raison de la taille de l'échantillon, il s'agit là d'une première approche pour analyser la relation entre les travaux réalisés et le temps de retour actualisé. L'augmentation de la taille de l'échantillon, au fil des années, nous permettra de réaliser une analyse par type de levier et par combinaison de leviers.

Y a-t-il une corrélation entre le temps de retour actualisé et le nombre de leviers de performance énergétique ?

Illustration 226 : Corrélation entre le temps de retour actualisé et le nombre de leviers d'action dans l'habitat individuel

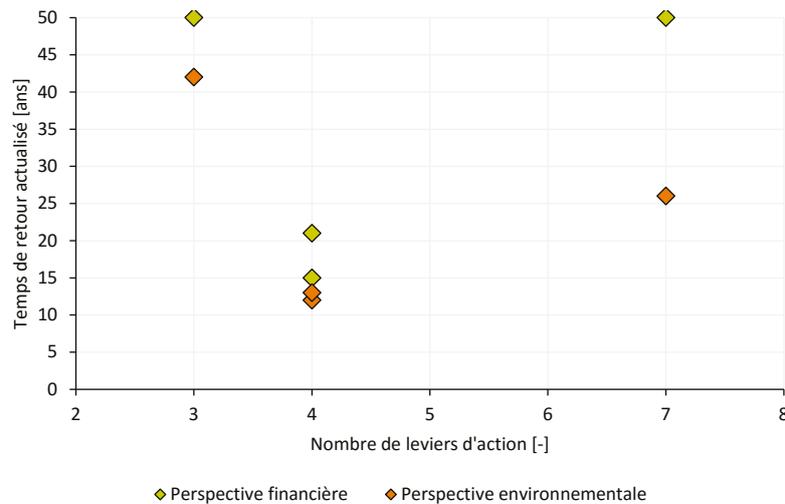


Pour atteindre la performance énergétique du cahier des charges PREBAT en habitat individuel, les améliorations ont porté sur au moins 4 leviers d'action. Les projets annonçant 4 leviers d'action ont un temps de retour actualisé très variable: de 20 à 46 ans en perspective environnementale et de 25 à 50 ans en perspective financière.

Il ne semble pas qu'un nombre de leviers d'action plus important réduise nécessairement le temps de retour actualisé: la maison MI36 présente un temps de retour de 8 ans en perspective financière grâce à 6 leviers d'action alors que le temps de retour actualisé de la maison MI35 est supérieur à 50 ans avec 8 leviers d'action. L'existence d'un optimum technico-économique à 6 postes doit cependant être confirmée par un échantillon de bâtiments plus important.

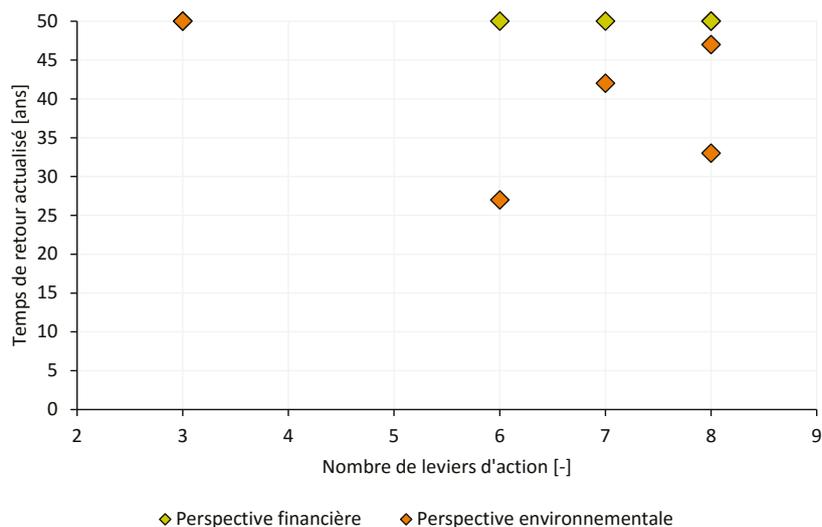
51. Source: rapport « La valeur verte dans l'immobilier » du Plan Bâtiment Durable de décembre 2013.

Illustration 227 – Corrélation entre le temps de retour actualisé et le nombre de leviers d'action dans l'habitat collectif



L'existence d'un optimum semble également pouvoir être observé pour l'habitat collectif: le temps de retour actualisé est le plus faible pour 4 leviers d'action alors que seulement 3 semblent nécessaires pour atteindre la performance du cahier des charges PREBAT.

Illustration 228 – Corrélation entre le temps de retour actualisé et le nombre de leviers d'action dans le tertiaire



Pour le tertiaire, un minimum de 3 leviers d'action sont nécessaires pour atteindre la performance énergétique PREBAT.

Sur le graphique (Illustration 228), nous constatons que la série de points ne permet pas d'observer un optimum. Ce résultat est peut-être dû à la grande diversité de typologie des bâtiments tertiaires.

À retenir

La performance énergétique est atteinte grâce à des améliorations sur plusieurs postes (au moins 4 pour l'habitat individuel et au moins 3 pour l'habitat collectif et le tertiaire).

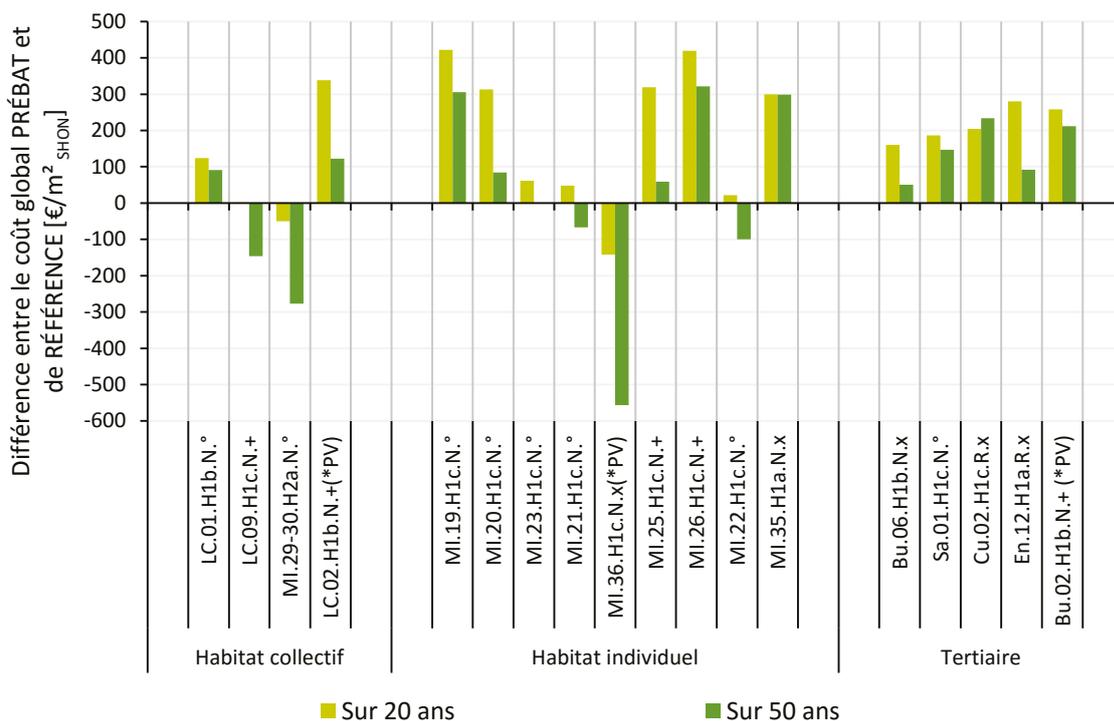
Il semble exister une corrélation non linéaire entre le temps de retour actualisé et le nombre de leviers d'action. Un nombre de leviers d'action à l'investissement plus important ne raccourcira pas nécessairement le temps de retour actualisé.

8.4.1 Une rentabilité difficile à atteindre en approche financière

Par rapport à l'approche environnementale, l'approche financière accorde plus d'importance à l'investissement présent (taux d'actualisation plus fort) et ne prend pas en compte les impacts environnementaux (non supportés par le porteur de projet). C'est le point de vue d'un investisseur occupant ou gestionnaire du bâtiment.

Les histogrammes représentent la différence entre le coût global PREBAT et le coût global du bâtiment de référence (€/m²) sur 20 ans et sur 50 ans. Une différence positive entre les deux signifie que le surcoût initial du PREBAT n'est pas compensé dans le temps par rapport à une solution classique. Lorsqu'elle devient négative, les coûts différés du PREBAT ont permis de compenser le surinvestissement initial.

Illustration 229 - Coût global en approche financière

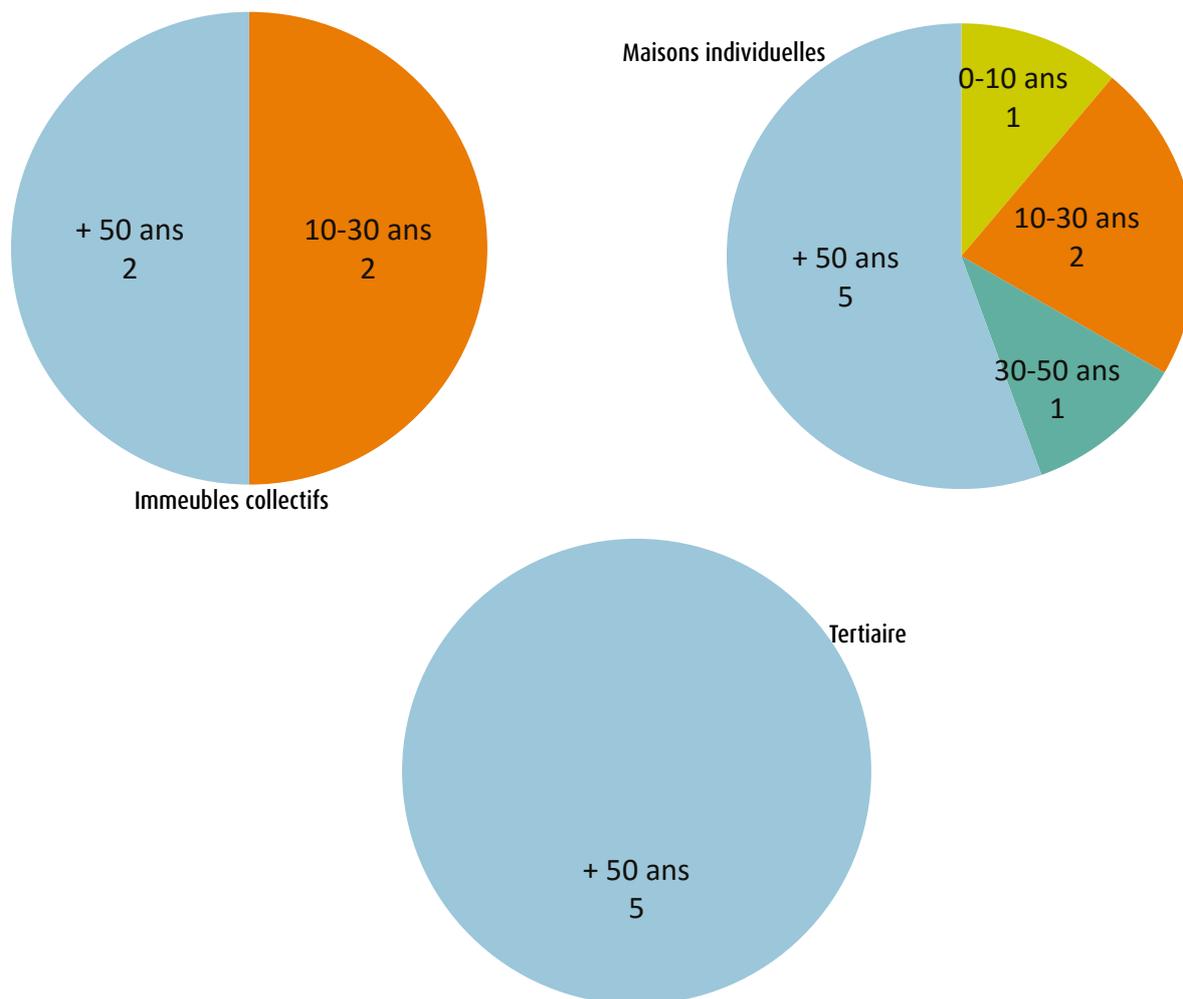


Dans une approche uniquement financière, l'effort d'investissement pour atteindre une performance énergétique supérieure par rapport à une opération « classique » RT 2005 est opportun dès lors que cet investissement est compensé sur la durée par une baisse des dépenses énergétiques (sous réserve que la maintenance et le remplacement des systèmes, qui peuvent être plus fréquents et/ou plus coûteux au vu de la technicité des systèmes, n'érodent pas ces gains).

Le graphique 229 montre que le coût global du PREBAT est inférieur à celui du bâtiment de référence sur 20 ans dans seulement 2 cas sur 18 opérations (barre d'histogramme négative): une maison individuelle et un immeuble collectif. Le coût global des bâtiments tertiaires PREBAT n'est jamais inférieur au coût global du bâtiment de référence.

L'opportunité financière est plus souvent observée lorsque la durée prise en compte s'allonge (6 cas sur 18 opérations pour le coût global sur 50 ans).

Illustration 230 – Répartition des temps de retour actualisés des opérations PREBAT en approche financière, par typologie



Pour les maisons individuelles et les immeubles collectifs, le temps de retour sur investissement est inférieur à 50 ans pour la moitié des opérations alors que pour le tertiaire, toutes les opérations ont un temps de retour supérieur à 50 ans.

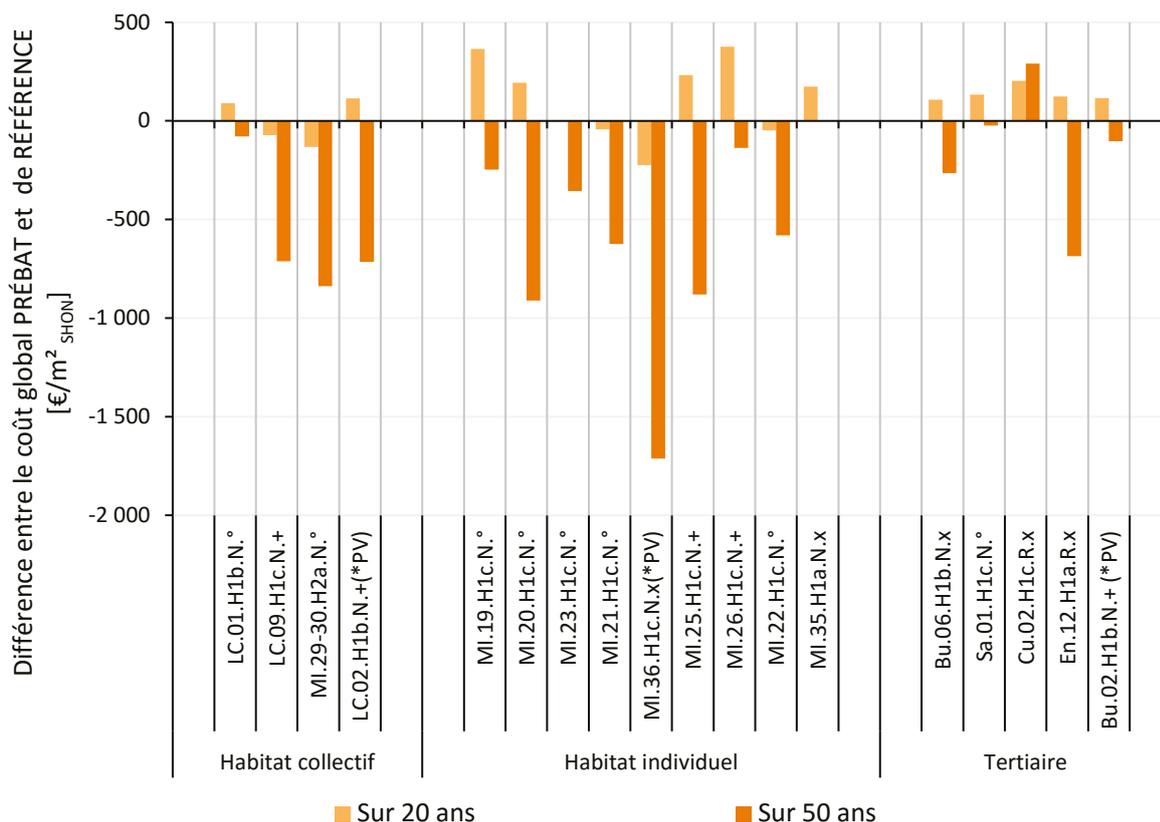
5 bâtiments d'habitation présentent un temps de retour inférieur à 30 ans.

Là encore, la valeur résiduelle n'a pas été prise en compte, ces résultats sont donc potentiellement soumis à une forte sensibilité.

8.4.2 Rentabilité des bâtiments PREBAT en approche environnementale

L'approche environnementale accorde le même poids aux coûts futurs et à l'investissement puisque les coûts différés ne sont pas actualisés. Elle prend également en compte l'impact environnemental du bâtiment en exploitation, en affectant un coût aux émissions de CO₂ liées aux consommations énergétiques (aujourd'hui non supporté par le porteur de projet). **C'est le point de vue de l'intérêt général intergénérationnel.**

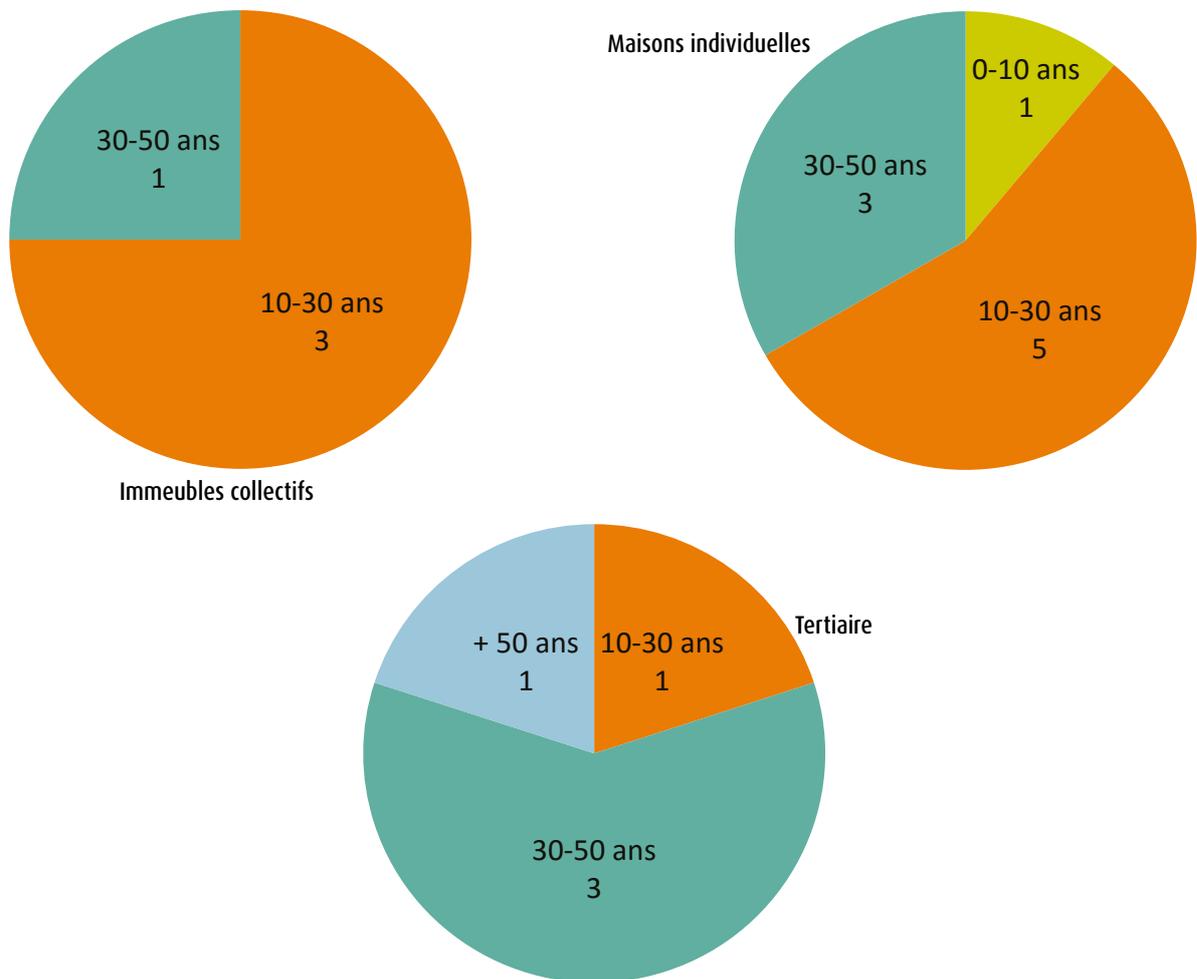
Illustration 231 – Coût global en approche environnementale



Dans une perspective environnementale, l'opportunité d'améliorer la performance énergétique au niveau basse consommation est avérée dans un tiers des cas sur 20 ans : sur les histogrammes ci-dessus, le coût global du PREBAT est inférieur à celui du bâtiment de référence sur 20 ans dans 6 cas sur 18 opérations (barre d'histogramme négative).

Sur une durée plus longue de 50 ans (histogramme rouge), on remarque que le coût global du PREBAT est très inférieur à celui du bâtiment de référence dans 17 cas sur 18 opérations. On observe une différence de plus de 500 € / m² de sur 50 ans dans la moitié des opérations.

Illustration 232 – Répartition des temps de retour actualisés des opérations PREBAT en approche environnementale, par typologie



Le temps de retour sur investissement des bâtiments PREBAT est plus rapide du point de vue de l'intérêt général intergénérationnel. 10 bâtiments PREBAT présentent un retour sur investissement de 30 ans ou moins, dont 6 avec un temps de retour inférieur ou égal à 20 ans. Ces 6 opérations sont des bâtiments d'habitation.

Nous retiendrons également qu'une seule opération (tertiaire) a un temps de retour sur investissement supérieur à 50 ans.

À retenir

Une meilleure rentabilité est observée pour les bâtiments d'habitation par rapport aux bâtiments tertiaires.

Un tiers des opérations présente un temps de retour actualisé, en approche environnementale, inférieur ou égal à 20 ans.





CONCLUSION

Plus de 200 bâtiments démonstrateurs basse consommation, lauréats des appels à projet PREBAT, font l'objet d'un suivi et d'une évaluation de leurs performances durant les deux premières années de leur fonctionnement. Un travail de capitalisation et d'analyse transversale de ces évaluations a été entrepris et s'appuie en 2016 sur 119 d'entre elles, achevées depuis 2012.

Le panel d'opérations correspondantes est constitué d'une diversité de bâtiments – maisons individuelles, habitats collectifs, bureaux, autres bâtiments tertiaires – situés dans plusieurs régions de climats différents. La performance visée par leurs concepteurs était en général supérieure au niveau du label BBC.

Ce programme de recherche ambitieux aura permis de constituer un socle de connaissances précieux sur cette nouvelle génération de bâtiments, dont la construction s'est maintenant généralisée avec l'entrée en vigueur de la réglementation thermique 2012. Il permet de vérifier les progrès importants qui ont été réalisés ces dernières années sur la performance énergétique des bâtiments en France.

La consommation d'énergie des bâtiments nouvellement construits est très inférieure à celle de la génération de la réglementation thermique 2005. Il apparaît désormais que les consommations réelles de chauffage ont été drastiquement réduites et descendent en moyenne en dessous de $25 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2.\text{an}$. Ces consommations se trouvent ainsi réduites à un niveau comparable aux autres postes réglementés que sont l'eau chaude sanitaire et l'éclairage.

Cela fait ainsi émerger de nouveaux enjeux d'efficacité énergétique, par exemple sur l'eau chaude sanitaire, mais aussi sur les postes de consommation hors réglementation thermique. Les consommations liées aux équipements mobiliers (informatique, multimédia...) et immobiliers non réglementés (ascenseurs, fermetures...) sont en effet équivalentes à la consommation des postes réglementés pour les bureaux et de l'ordre de $70 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2.\text{an}$ dans les habitations. Le choix et l'utilisation de ces équipements représentent un levier important de réduction des consommations d'énergie, en particulier pour les équipements bureautiques.

Pour parvenir à cette haute performance énergétique sur les postes réglementés, la conception et la mise en œuvre des bâtiments évalués se sont révélées d'une très grande qualité. D'une manière générale, les choix se sont portés vers les meilleures références de matériaux et d'équipements disponibles sur le marché. Ainsi le niveau d'isolation moyen de l'échantillon exprimé en U_{bat} se situe à $0,36 \text{ W.m}^2.\text{K}$ dans le neuf et à $0,47 \text{ W/m}^2.\text{K}$ en rénovation. Coté mise en œuvre, la perméabilité à l'air des enveloppes est réduite et de mieux en mieux traitée au fil des années. Les échangeurs des ventilations mécaniques double flux et les ventilations hygroréglables semblent également tenir leurs promesses en termes de performance énergétique.

Toutefois, des axes d'amélioration ont été révélés par la comparaison de la consommation calculée en phase de conception à la consommation mesurée pendant deux années d'utilisation. Il faut noter tout d'abord que cette comparaison ne peut pas être réalisée directement. En effet, les conditions météorologiques et d'occupation sont approchées par des modèles et des moyennes au moment de la conception.

Des écarts sont donc constatés dans la réalité, et ils peuvent être importants et varier d'une année à l'autre. Les températures de consigne réellement pratiquées, qui apparaissent dans la moitié des cas supérieures aux températures envisagées à la conception, font ainsi varier la consommation jusqu'à 15 kWh_{ep}/m².an sur l'échantillon. De la même manière, la variation des conditions météorologiques peut entraîner des écarts de consommation allant jusqu'à 10 kWh_{ep}/m².an.

Il a donc été nécessaire d'élaborer une méthode de comparaison qui passe par un nouveau calcul prenant en compte les conditions météorologiques et d'usage réelles, tout en conservant la performance de l'enveloppe et des systèmes retenue au moment de la conception.

Au regard des analyses qui ont pu être menées sur 24 des bâtiments de l'échantillon, les consommations mesurées durant les premières années apparaissent supérieures aux consommations recalculées en condition réelle. L'ordre de grandeur de l'écart sur les postes de consommation réglementés varie de 20 à 60 kWh_{ep}/m².an. Ce résultat est cependant surestimé en raison des limites inhérentes à la méthode d'évaluation, en particulier la prise en compte incomplète des conditions d'occupation réelles, du fait de l'imprécision dans l'information recueillie (scénario de fermeture des occultations par exemple) ou de l'impossibilité de prendre en compte certains paramètres dans le calcul en conditions réelles (scénario des réduits de chauffage par exemple).

La méthode employée présente ainsi des limites et des incertitudes qu'il est encore nécessaire d'étudier et de quantifier. Mais l'écart constaté rend compte néanmoins de différences de performances intrinsèques du bâtiment, qu'elles soient relatives à l'enveloppe ou aux systèmes.

Pour approfondir l'analyse, le Cerema a développé une méthode spécifique d'évaluation de la performance intrinsèque d'isolation en bâtiment occupé. Les résultats montrent que les niveaux d'isolation réellement mis en œuvre correspondent globalement aux niveaux très performants calculés selon les règles Th-Bât. Sur l'échantillon de 19 maisons individuelles apparaît ainsi un faible écart de l'ordre de 10 % ($U_{\text{bât évalué}}$ de 0,34 pour 0,31 W/m².K).

Les évaluations permettent aussi d'expliquer une partie des écarts de performance, par une conception des systèmes pas toujours adaptée au niveau d'isolation élevé des bâtiments à basse consommation (entraînant, notamment, un fonctionnement en sous-régime des chaudières et des pompes à chaleur). La mise en œuvre, les réglages, la programmation, le pilotage et l'entretien des systèmes représentent d'autres leviers d'amélioration de la performance énergétique.

La performance énergétique ne peut ainsi être atteinte qu'avec le concours de tous les acteurs, y compris même, les occupants, dont il convient d'anticiper au mieux les attentes, les besoins et les compétences, puisque l'enjeu énergétique n'est en général pas leur préoccupation principale.

Les pratiques des utilisateurs susceptibles d'entraver la performance énergétique proviennent généralement de dispositifs inadaptés à leur mode de vie ou de travail, de la difficulté à piloter ou entretenir les équipements du bâtiment ou d'un inconfort ressenti les amenant à les modifier.

La performance de ces bâtiments ne se limite pas à leurs consommations d'énergie : le confort et plus largement la qualité d'usage pour l'occupant en constituent des éléments importants et très largement liés aux consommations.

L'analyse des profils journaliers et hebdomadaires montre que le chauffage d'une maison individuelle peut être arrêté complètement la nuit et ce sans dégradation du confort grâce au niveau élevé de l'isolation, alors que la pratique des réduits de température de nuit est peu fréquente en habitat collectif.

Plus généralement le confort thermique s'avère très satisfaisant en hiver, alors qu'en période estivale les mesures et les ressentis sont plus mitigés : la forte isolation de ces bâtiments n'est pas néfaste en soi au confort d'été, mais celui-ci nécessite une gestion appropriée des protections solaires et de la ventilation notamment ; or il apparaît que nombre d'occupants, en particulier dans les régions septentrionales, n'ont pas les notions pour mettre en œuvre une telle gestion.

Les pratiques des acteurs s'avèrent un levier capital pour l'atteinte des performances attendues, qu'il s'agisse des acteurs de l'occupation et de la gestion, ou ceux de la réalisation et de la conception : c'est en fait l'ensemble du système d'acteurs qui est concerné.

À l'issue de ces travaux il ne fait plus de doute que l'étude de la performance réelle et l'identification de ses leviers d'action nécessitent une analyse croisée du fonctionnement technique du bâtiment et des comportements et jeux d'acteurs en présence.

Cette année, celle-ci a également été renforcée par une analyse sur le plan économique. Avec l'augmentation de la taille de l'échantillon d'opérations, dès 2017, elle devrait produire des enseignements plus significatifs sur la connaissance des coûts et la rentabilité économique.





ANNEXES - DÉTAIL DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION MISE EN ŒUVRE PAR LE CEREMA

A.1 Conditions météorologiques de l'année de suivi

Pour recalculer la consommation d'énergie primaire avec les conditions météorologiques de l'année de suivi, un fichier météo est créé. Il comprend les données météorologiques horaires suivantes :

- la température extérieure mesurée (°C) ;
- l'humidité de l'air (g/kg d'air sec) déduite de l'humidité relative mesurée (%) ;
- la vitesse du vent (m/s) ;
- l'ensoleillement direct et diffus selon les cinq orientations. C'est l'ensoleillement global horizontal (W/m²) qui est mesuré. La répartition direct/diffus et selon les cinq orientations (est, ouest, nord, sud, horizontale) est celle du fichier météorologique de la réglementation thermique, propre à la zone climatique.

Restent identiques au fichier de la réglementation thermique :

- la température du ciel (°C) ;
- la température de l'eau froide (°C).

Limites de la méthode :

- la répartition direct/diffus est définie pour la zone climatique, alors qu'en réalité elle dépend de la latitude et de la nature du ciel couvert/ensoleillé ;
- la vitesse du vent mesurée ne correspond pas à celle de Météo France (hauteur différente) ;
- des capteurs d'ensoleillement peuvent dysfonctionner et ne pas permettre de suivre l'ensoleillement ;
- l'emplacement de la station météo joue sur la qualité des données mesurées, mais vu la configuration de certains sites, il n'a pas toujours été possible de placer la station hors perturbations dues par exemple à des masques (au soleil ou au vent). La qualité de la mesure de la température extérieure est toutefois peu touchée.

A.2 Conditions d'occupation de l'année de suivi

La prise en compte des conditions d'occupation pour le recalcul selon la méthode de calcul Th-CE 2005 est faite au travers des trois indicateurs suivants : scénario d'occupation, apports internes et besoins des occupants (température et volume d'eau).

A.2.1 Scénario d'occupation

Un scénario d'occupation hebdomadaire correspondant à l'année de suivi est pris en compte. Ce scénario est relevé par enquête auprès des occupants et du gestionnaire. Il comprend heure par heure l'indication d'occupation ou non du bâtiment. Selon la méthode de calcul réglementaire, ce scénario est pris en compte dans le calcul des apports internes.

Limites de la méthode:

- le scénario d'occupation ci-dessus n'impacte que le calcul des apports internes selon la méthode de calcul Th-CE 2015;
- il n'est pas possible de prendre en compte un scénario de température de consigne. Seul le niveau de la température de consigne peut être modifié (§ A.2.3).

A.2.2 Estimation des apports internes

Pour le recalcul selon la méthode de calcul réglementaire, il est nécessaire d'estimer un taux horaire moyen d'apport interne en occupation. Pour cela:

- nous nous basons sur un scénario d'occupation hebdomadaire (déduit par enquête) avec un taux horaire d'occupation d'adultes et d'enfants. Les apports internes annuels liés à l'occupant sont ensuite déduits en fonction de leur activité (par exemple pour une activité sédentaire de type logement, école ou travail, la production d'énergie métabolique est de 70 W/m²) et de leur surface corporelle (1,8 m² pour un adulte, 0,8 m² pour un enfant);
- les apports internes annuels dus aux équipements sont déduits des consommations d'électricité spécifiques horaires mesurées hors éclairage: selon la méthode de calcul de la réglementation thermique, les apports internes pour le résidentiel sont hors éclairage. En effet, les apports internes liés à l'éclairage ne sont pas une donnée d'entrée mais un résultat à partir du calcul de la consommation d'éclairage;
- le taux moyen horaire d'apport interne est obtenu avec la somme annuelle des apports internes due à l'occupation et aux équipements, le tout divisé par le nombre d'heures d'occupation annuelles.

Limite de la méthode: conformément à la méthode de calcul Th-CE 2005, l'accès est limité à une donnée horaire moyenne, et il n'y a pas de variation possible du taux d'apport interne horaire selon un scénario.

Plus précisément, les apports internes sont évalués à partir d'une part des taux horaires d'occupation issus des enquêtes auprès des occupants, d'autre part de la mesure de la consommation électrique totale (hors production de chaleur, en cas de chauffage électrique, et hors installation d'éclairage). Les apports internes sont calculés en W/m² à partir de la période d'occupation réelle. Afin de pouvoir les comparer aux apports internes réglementaires, nous calculons les apports annuels équivalents par rapport à la période d'occupation réglementaire selon la formule suivante:

$$AI_{\text{évalué}} = \frac{AI_{\text{calculé}} \times \text{Occupation}_{\text{réelle}}}{\text{Occupation}_{\text{réglementaire}}}$$

avec:

$AI_{\text{évalué}}$: les apports internes équivalents par rapport à la période d'occupation réglementaire (W/m²);

$AI_{\text{calculé}}$: les apports internes calculés par rapport à la période d'occupation réelle (W/m²);

$\text{Occupation}_{\text{réelle}}$: la durée de la période d'occupation réelle (heures);

$\text{Occupation}_{\text{réglementaire}}$: la durée de la période d'occupation réglementaire (heures).

À titre d'illustration, nous prenons le cas d'une maison individuelle occupée en permanence par une seule personne. Les apports annuels calculés s'élèvent à 4,1 W/m² sur la période d'occupation réelle qui est de 168 heures par semaine pendant 52 semaines. Les apports internes équivalents sont calculés par rapport à la période d'occupation réglementaire, qui est de 128 heures par semaine pendant 52 semaines, de la manière suivante :

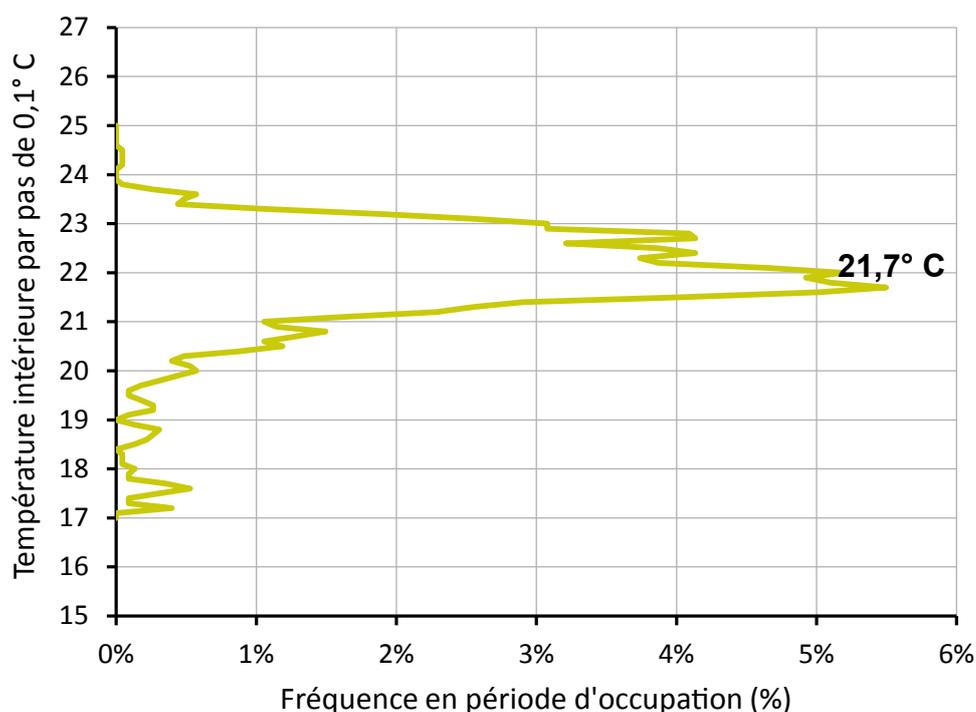
$$AI_{\text{évalué}} = \frac{4,1 \text{ W/m}^2 \times 168 \text{ heures} \times 52 \text{ semaines}}{128 \text{ heures} \times 52 \text{ semaines}} = 5,3 \text{ W/m}^2$$

Les apports internes évalués sont donc de 5,3 W/m² par rapport à la période d'occupation réglementaire. Cette valeur est à comparer à celle des apports réglementaires de 5 W/m².

A.2.3 Température de consigne observée

L'analyse statistique des températures en période de chauffe permet d'estimer la température de consigne en hiver en se basant sur la mesure de la température intérieure pendant les heures de fonctionnement du chauffage et pendant les heures d'occupation identifiées par enquête.

Illustration 233 – Détermination de la température de consigne en hiver



Limites de la méthode: la méthode n'est pas applicable en logement collectif avec chauffage collectif. En effet, il peut y avoir fourniture de chauffage, mais pas nécessairement dans le logement suivi. Dans ce cas, on se base sur une estimation de besoin de chaud pour savoir si l'on est en mode chauffage, et non sur la mesure.

A.2.4 Besoins d'eau chaude sanitaire (ECS)

Selon la méthode de calcul de la réglementation thermique, les consommations d'ECS sont calculées en fonction :

- de la performance du système de production d'ECS ;
- et du besoin d'ECS, exprimé en volume hebdomadaire (litres) d'ECS à 40 °C au puisage, réparti selon un scénario hebdomadaire de puisage, donné par destination d'usage du bâtiment (logement, bureau, hôtel, etc.) dans les règles Th-CE 10 (tableaux 36, reproduit dans l'illustration 234 ci-dessous, et 37 du chapitre 10 relatifs aux besoins d'ECS).

Illustration 234 – Besoins unitaires hebdomadaires d'ECS à 40 °C (règles Th-CE 2005)

Types d'usage	a	Nu
Maisons individuelles	$= (470.9 \ln(\text{Nu}) - 1075)/\text{Nu}$ si $\text{Nu} > 27 \text{ m}^2$ $= 17.7$ sinon	m ² de surface habitable
Logements collectifs	$= (470.9 \ln(\text{Nu_lgt}) - 1075)/\text{Nu_lgt}$ si $\text{Nu_lgt} \geq 27 \text{ m}^2$ $= 17.7$ sinon Avec $\text{Nu_lgt} = \text{Nu}/\text{nbre_lgt}$	m ² de surface habitable totale
Hébergement	330	Nombre de lits
Établissement sanitaire sans hébergement	120	Nombre de lits
Établissement sanitaire avec hébergement - avec Blanchisserie	1 050	Nombre de lits
Établissement sanitaire avec hébergement - sans Blanchisserie	665	Nombre de lits
Enseignement	Besoins d'eau chaude non pris en compte	
Bureaux		
Salles de spectacles, de conférences		
Commerces		
Restauration 2 repas par jour. Cuisine traditionnelle	255	Nombre de repas par service
Restauration 2 repas par jour. Self	95	Nombre de repas par service
Restauration 1 repas par jour. Cuisine traditionnelle	125	Nombre de repas par service
Restauration 1 repas par jour. Self	45	Nombre de repas par service
Hôtel - 1* - sans Blanchisserie	665	Nombre de chambres
Hôtel - 1* - avec Blanchisserie	830	Nombre de chambres
Hôtel - 2* - sans Blanchisserie	910	Nombre de chambres
Hôtel - 2* - avec Blanchisserie	1 075	Nombre de chambres
Hôtel - 3* - sans Blanchisserie	1 160	Nombre de chambres
Hôtel - 3* - avec Blanchisserie	1 325	Nombre de chambres
Hôtel - 4* et GC - sans Blanchisserie	1 405	Nombre de chambres
Hôtel - 4* et GC - avec Blanchisserie	1 570	Nombre de chambres
Établissement sportif	1 200	Nombre de douches installées

C'est pourquoi un recalcul est effectué en prenant en compte le besoin d'ECS annuel réel en kWh estimé à partir de la mesure du volume d'ECS produit, de sa température de préparation et de la température d'eau froide.

A.3 Caractérisation de la performance de l'enveloppe

A.3.1 Suivi de chantier et mesure à réception

Pour caractériser la performance de l'enveloppe et l'atteinte des objectifs, le Cerema met en œuvre un suivi de chantier, des mesures ponctuelles et une analyse des mesures spécifiques en phase exploitation.

Plusieurs visites sur chantiers permettent de vérifier la bonne mise en œuvre des isolants telle que prévue dans le calcul réglementaire et le CCTP. Les écarts sont répertoriés dans un cahier de suivi.

Lors de la réception des travaux, le suivi prévoit une mesure d'étanchéité à l'air avec localisation des fuites, qui est effectuée par une entreprise privée ou, à défaut, par le Cerema. Le Cerema effectue aussi, en période de chauffe, un diagnostic thermographique pour repérer des défauts de mise en œuvre (tout ne pouvant pas être identifié lors des visites de chantiers).

Enfin, les mesures en exploitation sont analysées pour reconstituer un coefficient de transmission thermique expérimental $U_{\text{bât évalué}}$.

A.3.2 Détermination de $U_{\text{bât évalué}}$

Le coefficient de déperdition thermique du bâtiment $U_{\text{bât}}$ est reconstitué à partir d'un bilan thermique des mesures sur une semaine de chauffe, selon la méthode d'équilibre des flux thermiques entrant et sortant de l'enveloppe.

Les apports solaires, les apports internes, les déperditions liées à la ventilation et à l'étanchéité de l'air et les apports du système de chauffage sont estimés heure par heure à partir des mesures.

Cela peut se traduire par l'équation suivante pour chaque heure, en négligeant le stockage (Illustration 235):

$$Q_{\text{app.chauf}} + Q_{\text{app.int}} + Q_{\text{app.sol}} + Q_{\text{pert.ventil}} + Q_{\text{pert.permea}} + Q_{\text{pert.env}} = 0$$

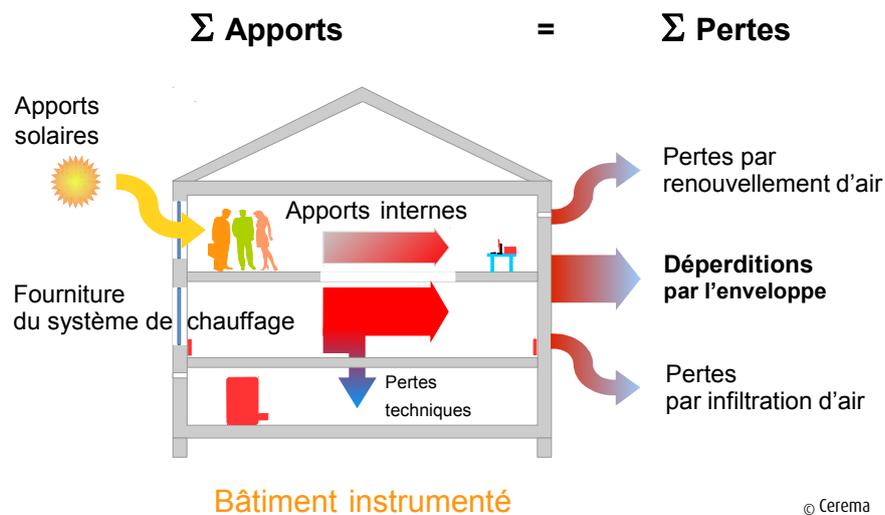
soit:

$$Q_{\text{app.chauf}} + Q_{\text{app.int}} + Q_{\text{app.sol}} + Q_{\text{pert.ventil}} + Q_{\text{pert.permea}} + U_{\text{bât}} (T_i - T_e) \times A_{\text{env}} = 0$$

avec:

- $Q_{\text{app.chauf}}$: la production de chauffage délivrée en zone chauffée au bâtiment;
- $Q_{\text{app.int}}$: les apports internes du bâtiment;
- $Q_{\text{app.sol}}$: les apports solaires reçus au sein du bâtiment;
- $Q_{\text{pert.ventil}}$: les pertes liées au renouvellement de l'air par ventilation;
- $Q_{\text{pert.permea}}$: les pertes liées au renouvellement de l'air dû aux défauts d'étanchéité à l'air du bâtiment;
- $Q_{\text{pert.env}}$: les pertes par transmission thermique au travers de l'enveloppe;
- T_i et T_e : respectivement la température intérieure (moyenne volumique) et la température extérieure;
- T_e : la surface déperditive de l'enveloppe du bâtiment.

Illustration 235 – Flux thermiques entrant et sortant de l'enveloppe



Tous les termes de l'équation – sauf les déperditions par transmission thermique de l'enveloppe – peuvent être estimés sur une semaine d'après les mesures horaires :

- les **apports solaires globaux** sont estimés à partir de la mesure de rayonnement global horizontal (ou à défaut des données de l'atlas solaire de la ville la plus proche) et du calcul de la « surface d'ouverture équivalente horizontale » en prenant en compte les surfaces vitrées et opaques de chaque façade, leur facteur solaire, leur orientation et la présence de masques proches ou lointains. La gestion des protections solaires est prise en compte *via* un coefficient de gestion des protections solaires horaire journalier (taux de fermeture). Celui-ci est déduit par enquête auprès des occupants ;
- les **gains internes** dus aux équipements sont estimés à partir des mesures horaires de consommation d'électricité spécifique et d'éclairage. Les gains internes dus à l'occupation sont estimés à partir du nombre et de l'âge des occupants, ainsi que de leur scénario d'occupation recueilli par enquête ;
- les **déperditions liées à la ventilation** sont basées sur la mesure des consommations horaires des ventilateurs. Les débits de ventilation sont alors déduits des consommations du ventilateur à partir de ses caractéristiques puissance/débit avec l'équation suivante :

$$P_{\text{ventilateur}} = 0,34 \times \text{Débit} \times (T_{\text{entrant}} - T_{\text{sortant}}) / 1000$$

- les **déperditions liées à l'étanchéité à l'air** du bâtiment sont calculées selon les règles Th-CE 2005 à partir de la mesure de l'étanchéité à l'air du bâtiment, Q_{4P_surf} ($m^3/h.m^2$), et des vitesses du vent horaires mesurées ;
- les apports du système de chauffage sont mesurés (à la sortie du générateur).

L'équilibre des flux thermiques doit être effectué sur une semaine (168 h) :

- pour s'affranchir de l'inertie **quotidienne** ;
- pour obtenir une meilleure précision, en considérant comme relativement stables les rythmes hebdomadaires d'occupation du bâtiment.

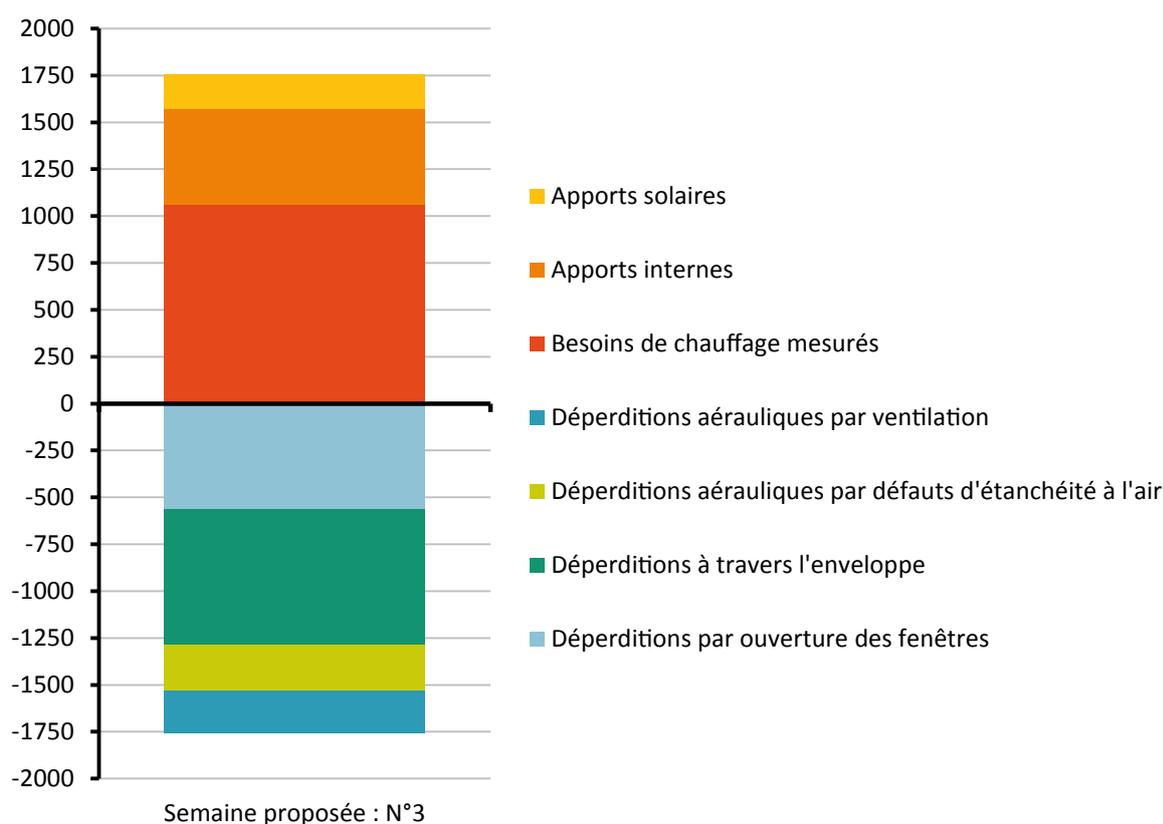
Le $U_{\text{bât}}$ retenu correspond à la valeur qui répond au mieux à l'équilibre thermique en période froide en considérant le $U_{\text{bât}}$ comme constant. Le choix des semaines se fait sur la base de plusieurs critères :

- les semaines choisies sont en régime d'occupation habituel (sans vacances ou fermetures) ;
- les semaines précédant immédiatement les semaines choisies sont à occupation habituelle (pas de relance exceptionnelle de chauffage) ;

- les semaines choisies sont parmi les plus froides de l'année, en évitant les périodes clémentes, car les actions de l'occupant ont un poids relatif élevé dans le bilan thermique (notamment l'ouverture des fenêtres);
- les bilans thermiques à $U_{\text{bât}}$ constant sur l'ensemble des semaines froides doivent présenter le meilleur équilibre possible, à savoir une somme des apports proche de celle des déperditions.

Le $U_{\text{bât évalué}}$ ainsi obtenu traduit la performance de l'enveloppe modulo les actions de l'occupant non prises en compte.

Illustration 236 – Exemple de bilan thermique sur la semaine la plus froide d'un logement collectif réhabilité à basse consommation



Limites de la méthode :

- débit de ventilation : le fonctionnement de la ventilation ne correspond pas toujours aux pressions préconisées et les courbes puissance/débit ne s'appliquent alors pas toujours. Par défaut sont alors utilisés les couples puissance/débit de l'étude thermique réglementaire. Cela peut être une source importante d'incertitude sur le calcul, car les déperditions par ventilation sont en général le deuxième poste de déperdition après celles par transmission thermique, et l'incertitude relevée se trouve être assez influente sur le résultat;
- apports internes : l'enquête ne concerne en général qu'un échantillon de cinq logements sur un bâtiment résidentiel. Les scénarios d'occupation et les apports internes en découlant peuvent alors être sources d'incertitudes. Toutefois, même si ces apports internes ne sont pas négligeables, le niveau d'incertitude reste limité et en général peu influent sur le bilan, sauf cas particulier (où les apports internes sont du même ordre de grandeur que les apports de chauffage).

A.4 Caractérisation de la performance des systèmes

A.4.1 Répartition entre les consommations de chauffage et d'ECS dans le cas d'une production à double usage

Dans le cas d'une production de chaleur pour le chauffage et l'ECS, il est nécessaire de répartir la consommation du système de production (C_1) pour déterminer la consommation de chauffage ($C_{1,Ch}$) et d'ECS ($C_{1,ECS}$). Pour cela, des compteurs de calories ont été posés pour déterminer le besoin de chauffage ($C_{2,Ch}$) et le besoin d'ECS ($C_{2,ECS}$). Les consommations de chauffage et d'ECS sont déterminées avec les formules suivantes :

$$C_{1,Ch} = \frac{C_{2,Ch}}{C_{2,Ch} + C_{2,ECS}} \times C_1 ; C_{1,ECS} = \frac{C_{2,ECS}}{C_{2,Ch} + C_{2,ECS}} \times C_1$$

Pour la plupart des opérations, les consommations de chauffage et d'ECS ont été déterminées par ces formules, mais dans certains cas la méthode a été adaptée aux contraintes de l'opération et de son instrumentation.

A.4.2 Ventilation double flux

La performance de la ventilation est caractérisée d'une part par l'énergie récupérée, et d'autre part par son efficacité.

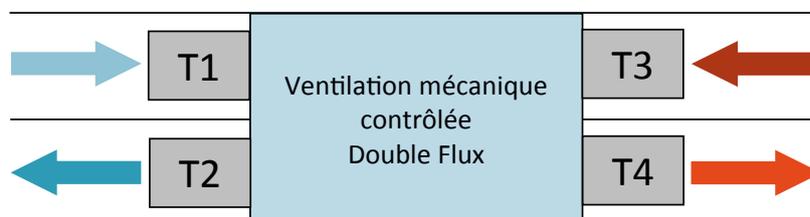
La formule de l'énergie récupérée instantanée est la suivante :

$$\dot{Energie\ récupérée} = |T_4 - T_1| \times Débit \times C_p \times \rho \text{ en Wh}$$

avec :

- ρ : la masse volumique de l'air ($1,25 \text{ kg/m}^3$);
- C_p : la capacité thermique massique de l'air (1005 J/kg.K);
- *Débit* : le débit horaire mesuré (ou débit fixe);
- T_1 : la température extérieure échangeur ($^{\circ}\text{C}$), correspondant à la température de l'air venant de l'extérieur avant l'entrée dans l'échangeur ;
- T_4 : la température de l'air soufflé ($^{\circ}\text{C}$), correspondant à l'air soufflé vers l'intérieur juste après son passage dans l'échangeur de chaleur.

Illustration 237 - Principe de mesure de la ventilation double flux



Dans l'analyse seront distinguées l'énergie « chaud » et l'énergie « froid » récupérées sur une année.

L'efficacité de l'échangeur est le pourcentage de l'énergie récupérable qui a été effectivement récupérée.

La formule de l'efficacité instantanée est la suivante :

$$Eff = \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_1}$$

avec :

- T_1 : la température extérieure échangeur (°C), correspondant à la température de l'air venant de l'extérieur avant son entrée dans l'échangeur ;
- T_2 : la température de l'air rejeté (°C) ;
- T_3 : la température de l'air repris (°C), correspondant à la température de l'air intérieur avant l'entrée dans l'échangeur ;
- T_4 : la température de l'air soufflé (°C), correspondant à l'air soufflé à l'intérieur juste après son passage dans l'échangeur de chaleur.

L'efficacité de l'échangeur est calculée sur les deux mois durant lesquels la différence entre la température extérieure et la température intérieure est la plus grande.

Limite de la méthode : la mesure des températures T_2 et T_4 n'est pas toujours réalisée et/ou réalisable.

Enfin, les gains que les échangeurs double flux ont apportés au besoin de chauffage en réchauffant l'air extérieur entrant dans l'enveloppe sont calculés à partir de la différence de température entre l'air neuf (extérieur) et l'air soufflé, et à partir du débit de soufflage, déduit de la consommation électrique de la VMC et du débit nominal.

$$Gains = 0,34 \times Q_{souf. RT} \times (T_{souf.} - T_{ext})$$

A.4.3 Chaudière (gaz, fioul, bois)

Pour les chaudières, la performance est caractérisée par son rendement saisonnier et par l'analyse de ses taux de charges.

Le rendement moyen correspond au rapport entre la somme de l'énergie produite (sur la période d'étude) et la somme de l'énergie consommée.

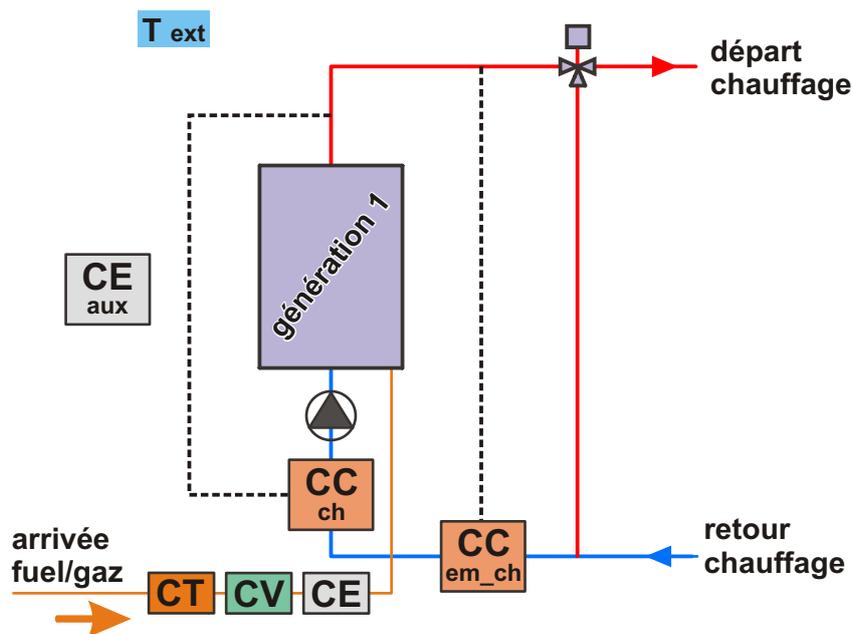
La formule est la suivante :

$$\text{Rendement} = \frac{\Sigma \text{énergie produite}}{\text{PCI} \times \Sigma \text{énergie consommée}}$$

avec *PCI*: pouvoir calorifique inférieur du combustible concerné (pour le gaz, il est indiqué dans les factures de consommation du bâtiment concerné).

La somme d'énergie produite est exprimée en kWh et la somme d'énergie consommée est exprimée en volume ou en masse selon le type de combustible et l'expression de son PCI.

Illustration 238 - Principe de mesure d'une chaudière



CE: compteur électrique

CV: compteur volumétrique

CT: compte tours

CC: compteurs d'énergie

Limite de la méthode: le rendement est très sensible au PCI que l'on utilise, or par exemple pour le gaz, il est variable d'un lieu à un autre et durant l'année.

A.4.4 Les pompes à chaleur (air/eau, eau/eau, sol/eau)

Pour l'analyse des performances des pompes à chaleur (PAC), on détermine le coefficient de performance (COP) saisonnier d'une part, et on analyse d'autre part l'évolution du COP hebdomadaire moyen en fonction de la température extérieure hebdomadaire moyenne et du nombre d'heures de fonctionnement hebdomadaire moyen.

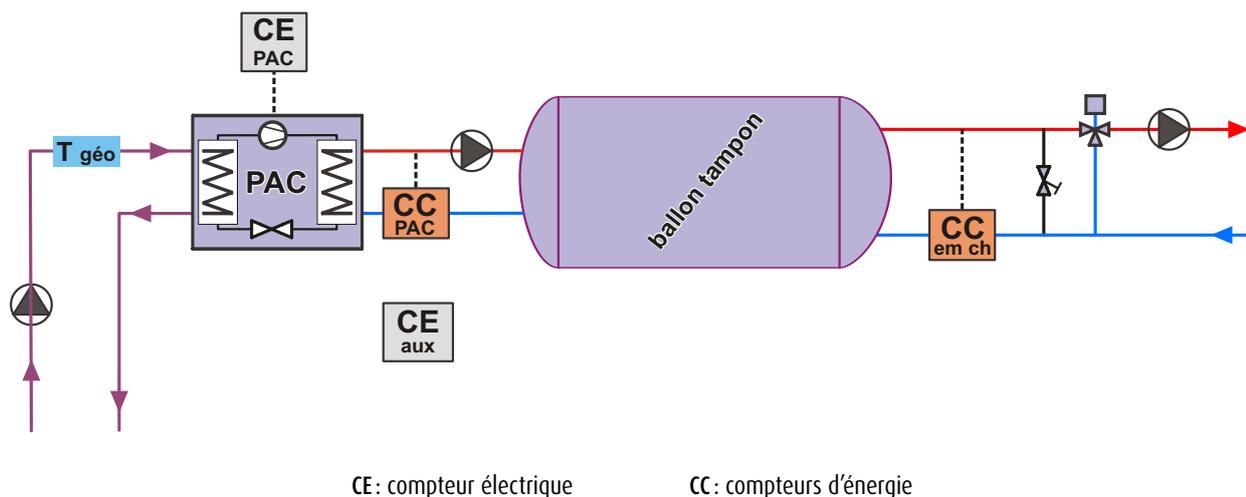
Le COP moyen correspond au rapport entre la production totale d'énergie produite sur la période d'étude et la consommation de la PAC sur cette même période :

$$COP = \frac{\sum \text{Energie produite}}{\sum \text{Energie consommée}}$$

ou bien :

$$COP = \frac{\sum \text{Energie produite}}{\sum \text{Energie consommée} - \sum \text{Conso des auxiliaires}}$$

Illustration 239 – Principe de mesure d'une PAC

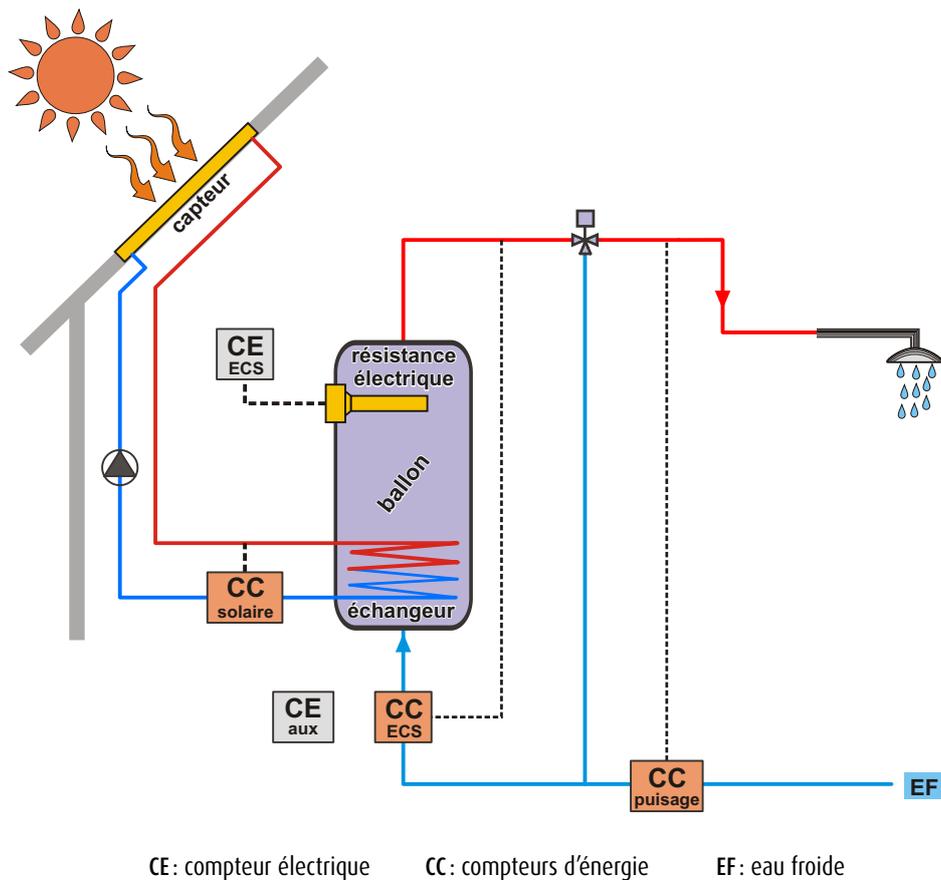


A.4.5 L'eau chaude sanitaire solaire

Sur un système d'eau chaude sanitaire solaire (ECS solaire), il est possible de mesurer les trois données suivantes (Illustration 240) :

- les besoins en ECS (Besoins);
- l'énergie fournie par les panneaux solaires (ECS solaire);
- l'énergie fournie par l'appoint (Appoint).

Illustration 240 – Principe de fonctionnement de l'ECS solaire



Cependant, seules deux d'entre elles sont nécessaires à l'analyse (la troisième étant déduite par soustraction ou addition) :

$$\text{Besoins d'ECS} = \text{ECS solaire} + \text{Appoint}$$

Pour évaluer la performance du système solaire, nous analysons le taux de couverture solaire hebdomadaire par rapport aux besoins d'ECS hebdomadaires.

La couverture solaire correspond à la part des besoins en ECS qui sont couverts par les panneaux solaires sur la période d'étude :

$$\text{Couverture solaire} = \frac{\sum \text{ECS solaire}}{\sum \text{besoins d'ECS}}$$

A.4.6 Le puits canadien

L'énergie chaude récupérée par un puits canadien correspond à l'énergie récupérée par l'air lors de son passage dans le puits canadien. Le calcul de cette énergie récupérée est la suivante :

$$\text{Energie récupérée} = |(T_i - T_e)| \times \text{Débit} \times C_p \times \rho \quad \text{en kWh}$$

avec :

T_i : la température de l'air sortant du puits canadien du côté intérieur (en °C) ;

T_e : la température de l'air entrant dans le puits canadien du côté extérieur (en °C) ;

C_p : la chaleur massique de l'air (1005 J/kg.K) ;

ρ : la masse volumique de l'air (1,25 kg/m³).

L'énergie récupérée n'est calculée que lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à 16 °C et inférieure de 2 °C à la température intérieure (conditions hivernales).

L'énergie récupérée n'est calculée que lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à 16 °C et inférieure de 2 °C à la température intérieure (conditions hivernales).

L'énergie froide récupérée correspond à l'énergie libérée par l'air chaud lors de son passage dans le puits canadien. Elle se calcule de la même manière que l'énergie chaude récupérée. Cependant, elle est calculée uniquement si la température de l'air extérieur est supérieure à 25 °C et si la différence de température avec l'air intérieur est supérieure à 2 °C.

A.5 Analyse des pratiques et de la qualité d'usage

Le Cerema s'est doté d'un outil visant à quantifier les grandes tendances en matière de pratiques des acteurs et de confort d'usage, ceci à partir d'**indicateurs clés** tels que par exemple la qualité d'appropriation des différents systèmes (chauffage, VMC...), l'appréciation du confort thermique, lumineux ou acoustique, ou l'appréciation de la performance énergétique du point de vue de l'occupant. Chaque indicateur comporte une échelle de niveaux, par exemple, concernant l'appropriation de chaque système : « plutôt bonne », « des difficultés », « variable selon les usagers », « ne dispose pas de l'information ou information non fiable » ; ou concernant les différents confort : « plutôt agréable », « plutôt inconfortable », « cela dépend des usagers », « ne dispose pas de l'information ou information non fiable ». L'ensemble des questionnaires correspondants a été soumis aux suiveurs-évaluateurs du Cerema et à certains bureaux d'études. En 2016, les résultats sont variables et le panel exploitable est plus réduit que celui sur lequel s'appuient les analyses techniques. Ainsi des retours sur les pratiques des acteurs ont été obtenus pour 54 opérations, sur les 84 interrogées.

Ces mêmes thématiques ont fait l'objet de **questionnaires plus approfondis**.

En 2016, ces questionnaires restent toutefois, pour la plupart, difficilement exploitables compte tenu de la faiblesse de certains sous-échantillons et des retours sous forme de commentaires n'ayant été obtenus que pour 31 bâtiments.

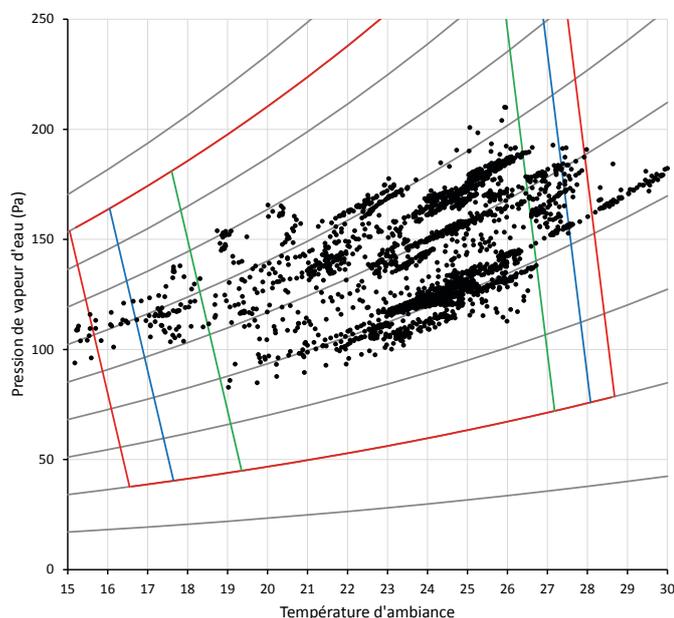
Bien que tous ces questionnaires soient remplis par les suiveurs, les données sont issues d'interviews, de questionnaires auprès des usagers et dans une moindre mesure de l'évaluation par la personne en charge du suivi.

A.6 Analyse du confort thermique mesuré

L'analyse du confort d'été, de mi-saison et d'hiver est effectuée pour les périodes d'occupation *via* l'estimation des indicateurs de confort à partir des mesures de températures intérieure, extérieure et des données d'occupation. Les indicateurs analysés sont notamment les suivants :

- diagramme de l'air humide : son objectif est de vérifier le confort lié à l'humidité et à la température de l'air dans le bâtiment. La température de l'air ambiant figure en abscisse, et l'humidité absolue en ordonnée (en kg de vapeur d'eau par kg d'air sec). Les courbes noires sont des courbes à humidité relative constante (la plus haute correspond à la saturation). Les quadrilatères vert, bleu et rouge correspondent à différentes zones de confort ;

Illustration 241 - Exemple de diagramme de l'air humide pour un logement en été

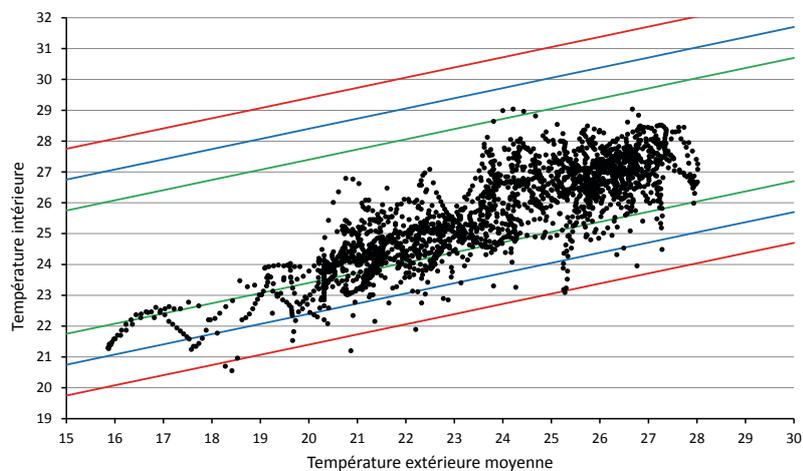


- nombre d'heures d'inconfort correspondant au niveau d'ambiance de type IV de la norme EN NF 15251 (annexe A). Il prend en compte l'adaptation physiologique des usagers à l'épisode météorologique. Le nombre d'heures selon les différentes catégories de confort de la norme EN NF 15251 en ambiance non contrôlée et en ambiance contrôlée est également fourni ;

Illustration 242 - Exemple de tableau détaillant le nombre d'heures selon les catégories de confort de la norme sur le confort adaptatif EN NF 15251 pour un logement en été

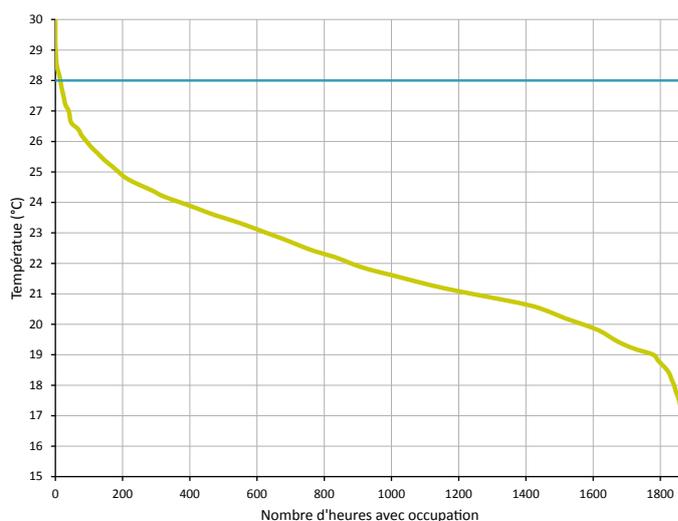
EN NF 15251 Nombre d'heures	Ambiance contrôlée	Ambiance non contrôlée
Catégorie IV -	49 h	208 h
Catégorie III -	48 h	105 h
Catégorie II -	255 h	201 h
Catégorie I	938 h	2075 h
Catégorie II +	1236 h	16 h
Catégorie III +	33 h	0 h
Catégorie IV +	57 h	0 h

Illustration 243 – Exemple de graphique des températures acceptables selon EN NF 15251 pour un logement en été



- fréquence cumulée des températures, et, pour l'été, le nombre d'heures où la température est supérieure à 28 °C;

Illustration 244 - Exemple de fréquence cumulée de températures pour un logement en été



- température intérieure conventionnelle de confort thermique d'été *in situ* ($T_{iC_{in situ}}$): « Tic » mesurée les jours les plus chauds de la saison d'été considérée. Il est difficile de la comparer à la Tic du calcul réglementaire, car celle-ci est calculée pour des conditions météorologiques conventionnelles différentes des conditions de suivi.

A.7 Analyse économique

A.7.1 L'échantillon

45 bâtiments sont concernés par le volet économique de la capitalisation 2016. Dans 11 cas, les données financières sur l'opération sont manquantes.

Sur les 34 opérations restantes, 16 offrent des données insuffisantes et l'analyse n'a pas pu être réalisée pour les raisons suivantes :

- liste des données financières à fournir par le maître d'ouvrage à la réception du chantier non précisée dans le dossier de demande de subvention ;
- absence de données économiques et contact rompu avec le maître d'ouvrage, ou délai de recueil des données auprès du maître d'ouvrage incompatible avec le calendrier du retour d'expériences ;
- des chiffrages globalisés (réhabilitation + neuf avec systèmes de chauffage et d'ECS collectifs ; ZAC) ;
- des problèmes sur la métrologie qui impacteront le coût de fonctionnement ;
- des données manquantes : consommations, coût d'investissement détaillé, coûts de maintenance ;
- une incohérence entre les consommations du bâtiment de référence et le surcoût annoncé par le maître d'ouvrage.

Les données de 18 bâtiments ont pu être exploitées. Les caractéristiques de ces opérations sont décrites dans le tableau suivant.

Illustration 245 – Caractéristiques de l'échantillon d'analyse économique

	Maisons individuelles	Immeubles collectifs	Bâtiments tertiaires
<i>Localisation</i>	Auvergne Rhône-Alpes : 7 Normandie : 2	Alsace Lorraine Champagne-Ardenne : 2 Auvergne Rhône-Alpes : 1 Bretagne : 1	Alsace Lorraine Champagne-Ardenne : 2 Limousin : 1 Île-de-France : 1 Auvergne Rhône-Alpes : 1
<i>Performance thermique</i> (C_{ep} en kWh _{ep} /m ² .an) avec déduction PV	de 12,83 à 90,95	de 0,07 à 97,37	de 31,32 à 81,79
<i>Nombre de bâtiments avec une installation photovoltaïque</i>	1	1	1
<i>Maître d'ouvrage</i>	Organisme de logements sociaux : 7 Particulier : 2	Organisme de logements sociaux : 3 Organismes et promoteurs privés : 1	Organismes et promoteurs privés : 2 État et collectivités territoriales : 3
<i>Année de l'investissement</i>	2009 à 2012	2009 à 2012	2009 à 2012

A.7.2 Calcul en coût global actualisé

Le coût global calculé dans l'étude prend en compte :

- les coûts d'investissement du bâtiment (I) hors foncier (coûts de la construction livrée et coûts des études);
- les coûts énergétiques des cinq usages de la réglementation thermique (chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage, refroidissement et auxiliaires), qu'il s'agisse de consommations électriques (Eél), de gaz (Egaz), de fioul (Efioul), de bois (Ebois), de granulés (Egr);
- les coûts d'entretien (Et) des équipements techniques ou éléments du bâti impactant la performance énergétique du bâtiment;
- les coûts de remplacement (R) des équipements techniques ou éléments du bâti impactant la performance énergétique du bâtiment;
- dans le cas de l'approche environnementale seulement, les coûts des émissions de CO₂ (Em) en phase d'exploitation (i.e. liées aux consommations d'énergies).

De ces différents coûts sont déduits, le cas échéant, les gains apportés par la revente sur le réseau de la production d'électricité photovoltaïque (E_{pv}).

On rappelle que :

- le remplacement des équipements est considéré à l'identique à la fin de leurs durées de vie respectives (Illustration 246);
- le coût de maintenance d'un équipement est évalué comme un pourcentage du coût d'investissement de l'équipement en question (Illustration 246);
- l'inflation générale des prix n'est pas prise en compte dans le calcul;
- on ne considère pas de valeur résiduelle.

L'ensemble des coûts est actualisé par un facteur commun (a) et les coûts des différentes énergies subissent une inflation (i_e = i_{elec}, i_{gaz}, i_{fioul}, i_{bois} ou i_{gr}) annuelle régulière sur toute la période de calcul.

Le coût global actualisé est calculé sur une période de temps N de la façon suivante :

$$\text{Coût global (étendu)} = I + \sum_{\text{elec, gaz, ...}} \sum_{n=1}^N \frac{E_e \times (1 + i_e)^n}{(1 + a)^n} + \sum_{n=1}^N \frac{E_t}{(1 + a)^n} + \sum_{n=1}^N \frac{R}{(1 + a)^n} - \sum_{n=1}^N \frac{E_{pv}}{(1 + a)^n} + \sum_{n=1}^N \frac{E_m}{(1 + a)^n}$$

Complément sur l'inflation du prix des énergies

Les taux d'inflation des prix des énergies sont issus d'une moyenne des prix **constatés** sur la période 2005-2015, et répertoriés dans la base de données PEGASE (SOES). Or une partie de l'évolution de ces prix est due chaque année à l'inflation générale, indépendante des fluctuations propres aux marchés des énergies. Puisque celle-ci n'est pas prise en compte dans le calcul de coût global réalisé ici, il est nécessaire de corriger les taux constatés par la formule suivante :

$$t_{\text{corrigé}} = \frac{1 + t_{\text{constaté}}}{1 + \text{inflation générale}} - 1$$

On obtient :

	Inflation constatée (% / an)	Taux corrigés (% / an)
Électricité	3,05 %	1,67 %
Gaz	5,39 %	3,93 %
Fioul	6,29 %	4,47 %
Bois	3,27 %	1,79 %
Granulés	7,27 %	5,76 %
Réseau de chaleur	5,23 %	3,82 %

Illustration 246 – Durées de vie et évaluation des coûts de maintenance
en fonction de l'investissement initial pour chaque équipement

	Descriptif		Ratio (% de l'investissement initial)	Durée de vie (ans)
Gros-œuvre	Menuiseries	Menuiseries extérieures bois	5%	30
		Menuiseries extérieures acier	3%	25
		Menuiseries extérieures PVC	1%	25
		Menuiseries extérieures aluminium	1%	25
	Façade	Ravalement façade peinture	1%	20
		Réfection enduit	1%	25
	Couverture	Couverture en tuiles	5%	50
		Couverture en ardoises naturelles	5%	60
		Couverture en ardoises fibro-ciment	5%	30
		Couverture en bardeau bitumeux	5%	20
		Couverture zinc	4%	35
		Couverture cuivre	5%	50
		Couverture bac acier	5%	25
		Toiture terrasse étanchéité	5%	20
	Toiture terrasse protection lourde	10%	30	
Chauffage	Production	Chaudière à condensation	2%	20
		Chaudière à évacuation directe	2%	20
		Chaudière avec conduit d'évacuation	2%	20
		Brûleurs fioul, gaz	5%	10
		Pompe à chaleur air/eau	3%	15
	Émission	Radiateur à eau	1%	40
		Convecteur électrique	1%	20
		Radiateur à accumulation	1%	25
		Chauffage électrique par le sol	2%	40
		Tubes radiants à gaz	6%	10
		Pompe à chaleur air/air	3%	15
		Pompe à chaleur eau/eau	3%	15
		Appareil de chauffage d'air électrique	2%	20
	Distribution	Pompe de circulation	2%	15
	Régulation	Thermostat des radiateurs	4%	15
		Matériel de régulation	3%	20
		Système de régulation centrale	4%	20
		Robinet thermostatique	1,5%	20
Vannes de régulation automatiques		6%	15	
Vannes de régulation manuelles		4%	30	
ECS	Chauffe-eau électrique	5%	15	
	Chauffe-eau gaz	9%	15	
	Chauffe-eau solaire	3%	20	
	Capteurs solaires plan ou sous vide	0,5%	20	
	Chauffe-eau thermodynamique	3%	15	
Ventilation	Extracteur VMC simple flux	3%	30	
	Extracteur VMC double flux	3%	30	
Climatisation	Unité de climatisation d'air	4%	15	
	Refroidisseurs d'air	2%	20	
	Ventilo-convecteur	4%	15	

Sources :

- Norme NF EN 15459 sur la performance énergétique des bâtiments (annexe A)
- *La maintenance des bâtiments* / Jean-René Albano / éditions Le Moniteur





TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	7
1. Une expérimentation de bâtiments démonstrateurs	7
2. Une capitalisation d'enseignements opérationnels	8
3. Une capitalisation progressive	9
4. Un échantillon diversifié d'opérations à basse consommation	10
5. Des définitions et conventions de présentation des résultats	14
MÉTHODE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES ET DU CONFORT	19
1. Une méthode tournée vers la caractérisation <i>in situ</i> et l'explication des écarts de consommation	19
2. Différents objectifs d'évaluation basés sur les mesures	20
3. Une méthode de suivi associant mesure, observation et enquête	20
4. Une méthode spécifique d'analyse des écarts entre consommation mesurée et consommation de l'étude thermique	21
1 - CONSOMMATIONS, PRODUCTIONS ET PERFORMANCES D'ENSEMBLE	25
1.1 Consommation totale mesurée	26
1.2 Répartition des postes de consommation	28
1.2.1 Une part importante des postes non réglementés	28
1.2.2 Une répartition des postes réglementés en évolution	35
1.3 Évolution des consommations dans les premières années de suivi	41
1.4 Production d'électricité photovoltaïque	44
1.5 Performances attendues et mesurées	46
1.6 Explication des écarts constatés	48
2 - CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES	53
2.1 Niveaux de température extérieure hivernale	54
2.2 Température extérieure de non-chauffage	55
2.3 Impact sur la consommation de chauffage	57
3 - CONDITIONS D'OCCUPATION	61
3.1 Température de chauffage	62
3.1.1 Les températures de consigne constatées	62
3.1.2 Analyse du besoin de chauffage mesuré (ou énergie utile de chauffage) en fonction de la température de consigne	66
3.1.3 Impact calculé des températures de consigne pratiquées sur la consommation de chauffage	67

3.2 Réduits de température de chauffage	70
3.2.1 Profils journaliers observés de températures et de fourniture de chauffage	70
3.2.2 Identification des réduits journaliers et hebdomadaires par la puissance de chauffage	73
3.2.3 Impact observé des réduits journaliers de chauffage sur les températures intérieures	77
3.2.4 Comparaison avec la méthode Th-CE (RT 2005).....	80
3.3 Apports internes	83
3.3.1 Les niveaux d'apports internes hors éclairage	83
3.3.2 Les périodes d'occupation	85
3.3.3 Analyse des besoins de chauffage mesurés en fonction des apports internes.....	88
3.3.4 Impact calculé des apports internes constatés sur la consommation de chauffage	88
3.4 Combinaison des conditions météorologies et d'occupation	90
3.5 Besoin en eau chaude sanitaire	92
3.5.1 Les besoins en eau chaude sanitaire évalués	92
3.5.2 Impact calculé des besoins en ECS évalués sur la consommation du poste ECS	93
4 - PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DU BÂTI	95
4.1 Caractéristiques des enveloppes de l'échantillon	96
4.1.1 L'isolation des parois verticales opaques	97
4.1.2 Planchers bas.....	102
4.1.3 Planchers hauts	102
4.1.4 Baies vitrées	103
4.1.5 Synthèse des performances thermiques	106
4.2 Isolation thermique de l'enveloppe	107
4.2.1 Coefficient de déperdition par transmission thermique à la conception ($U_{bât}$).....	107
4.2.2 Mise en œuvre de l'isolation	110
4.2.3 Coefficient évalué de déperdition par transmission thermique ($U_{bât}$ évalué).....	113
4.2.4 Impact du $U_{bât}$ sur le besoin de chauffage.....	116
4.3 Perméabilité à l'air de l'enveloppe.....	118
4.3.1 Perméabilité à l'air mesurée	118
4.3.2 Impact du système constructif sur la perméabilité à l'air.....	120
4.3.3 Impact calculé de la perméabilité à l'air mesurée sur le besoin de chauffage	122
5 - PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES SYSTÈMES TECHNIQUES.....	125
5.1 Chauffage	126
5.1.1 De la simple chaufferie à la chaufferie trop complexe.....	126
5.1.2 Consommation de chauffage	128
5.1.3 Le gain sur le besoin de chauffage lié aux échangeurs des ventilations double flux.....	130
5.1.4 Performance des équipements.....	131
5.1.5 Des réseaux de distribution dont l'isolation pourrait être améliorée	135
5.1.6 Des émetteurs de chaleur généralement à basse température.....	136
5.1.7. Des systèmes de régulation qui posent parfois des problèmes.....	137
5.2 Eau chaude sanitaire.....	138
5.2.1 Des systèmes de production divers.....	138
5.2.2 Des consommations d'énergie très variables.....	139
5.2.3 Zoom sur l'ECS solaire.....	141
5.2.4 Des distributions aux pertes non négligeables	148
5.2.5 Les ballons thermodynamiques	148
5.3 Ventilation	150
5.3.1 Une prédominance des systèmes double flux dans l'échantillon.....	150
5.3.2 Consommations de ventilation	151
5.3.3 En tertiaire, des consommations élevées en inoccupation.....	153
5.3.4 Des échangeurs double flux qui tiennent leurs promesses.....	154
5.3.5 Des pratiques à optimiser	157

5.4 Auxiliaires.....	159
5.5 Refroidissement	165
5.6 Éclairage	167
5.6.1 Des consommations dans le champ réglementé très variables	167
5.6.2 Quelques conceptions recherchées en éclairage naturel.....	168
5.6.3 Parties privatives des logements.....	169
5.6.4 Parties communes en habitat collectif	171
5.6.5 Bâtiments tertiaires.....	173
5.6.6 Parkings souterrains	175
5.6.7 L'éclairage extérieur : attention à son pilotage	176
5.6.8 L'adaptation aux locaux, clé de la performance de la commande d'éclairage	178
5.6.9 Consommation de veille des équipements de commande de l'éclairage.....	178
5.6.10 Les occupants, victimes de l'automatisation des commandes	179
5.7 Autres équipements immobiliers.....	180
5.7.1 Consommation d'électricité et répartition selon l'usage.....	180
5.7.2 Zoom sur les ascenseurs	183
5.7.3 Zoom sur l'éclairage de sécurité	186
5.7.4 Zoom sur la récupération d'eau de pluie	188
5.8 Équipements mobiliers	189
5.8.1 Consommation d'électricité et répartition selon les usages.....	189
5.8.2 Zoom sur la bureautique dans le tertiaire	192
5.8.3 Zoom sur les serveurs bureautiques en tertiaire.....	194
5.8.4 Zoom sur les autres équipements bureautiques en tertiaire.....	197
5.8.5 Zoom sur les autres équipements mobiliers en tertiaire.....	199
5.8.6 Utilisation des prises programmables et clés de coupure en tertiaire.....	200
5.8.7 La puissance de veille en logements.....	204
5.8.8 L'électroménager : des équipements anciens très consommateurs	207
5.9 Installations photovoltaïques	208
6 - PRATIQUES DES ACTEURS AU REGARD DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE	213
6.1 Précisions sur les résultats obtenus	214
6.2 Acteurs de la construction-rénovation.....	215
6.3 Des acteurs de la construction à ceux de l'utilisation	218
7 - CONFORT THERMIQUE ET QUALITÉ D'USAGE	221
7.1 Satisfaction des occupants et confort perçu	222
7.2 Confort thermique : différents enjeux selon les saisons	223
7.3 Confort thermique d'hiver.....	224
7.4 Confort thermique d'été	225
7.4.1 Le niveau de confort en période estivale des bâtiments non climatisés varie d'excellent à passable	226
7.4.2 Le niveau de confort varie au sein d'un même bâtiment selon les modes d'occupation	228
7.4.3 Les températures baissent peu la nuit	229
7.4.4 Les températures maximales atteintes sont inférieures à la température maximale conventionnelle Tic.....	230
7.4.5 L'évaluation du confort thermique doit prendre en compte la rigueur climatique	231
7.4.6 Les pratiques de gestion thermique d'été sont culturelles	233
7.4.7 Quelques enseignements sur le rafraîchissement par ventilation mécanique.....	233
7.5 Confort thermique de mi-saison : certains bâtiments présentent des niveaux de température élevés	234
7.6 Inconfort thermique et difficultés de compréhension.....	235
7.7 Autres aspects de la qualité d'usage	236

8 - COÛTS	239
8.1 Échantillon de la capitalisation économique 2016	240
8.2 Analyse en coût global	241
8.2.1 Principe de l'approche en coût global.....	241
8.2.2 Méthodologie adoptée pour l'analyse des bâtiments PREBAT	242
8.3 Le coût d'investissement.....	246
8.3.1 Un effort financier supplémentaire à l'investissement	246
8.3.2 Des leviers d'action variables selon les typologies.....	251
8.4 Le coût global.....	255
8.4.1 Une rentabilité difficile à atteindre en approche financière.....	259
8.4.2 Rentabilité des bâtiments PREBAT en approche environnementale	261
CONCLUSION	265
ANNEXES - DÉTAIL DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION MISE EN ŒUVRE PAR LE CEREMA	269
A.1 Conditions météorologiques de l'année de suivi.....	269
A.2 Conditions d'occupation de l'année de suivi	269
A.2.1 Scénario d'occupation.....	270
A.2.2 Estimation des apports internes	270
A.2.3 Température de consigne observée.....	271
A.2.4 Besoins d'eau chaude sanitaire (ECS)	272
A.3 Caractérisation de la performance de l'enveloppe	273
A.3.1 Suivi de chantier et mesure à réception.....	273
A.3.2 Détermination de $U_{bât}$ évalué.....	273
A.4 Caractérisation de la performance des systèmes.....	276
A.4.1 Répartition entre les consommations de chauffage et d'ECS dans le cas d'une production à double usage	276
A.4.2 Ventilation double flux	276
A.4.3 Chaudière (gaz, fioul, bois).....	278
A.4.4 Les pompes à chaleur (air/eau, eau/eau, sol/eau).....	279
A.4.5 L'eau chaude sanitaire solaire	280
A.4.6 Le puits canadien.....	281
A.5 Analyse des pratiques et de la qualité d'usage.....	281
A.6 Analyse du confort thermique mesuré	282
A.7 Analyse économique	284
A.7.1 L'échantillon	284
A.7.2 Calcul en coût global actualisé.....	285
GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS	295
CONVENTIONS DE PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	297





GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS

Auxiliaires : appareils électriques nécessaires au fonctionnement des installations de chauffage/refroidissement des locaux et de l'eau chaude sanitaire, tels que les pompes et circulateurs, mais ici, contrairement à la réglementation thermique, hors moteurs de ventilation ou de traitement d'air, désignés par le terme **ventilation**.

BBC : bâtiment à basse consommation.

BET : bureau d'études.

CCTP : cahier des clauses techniques particulières (notamment du marché de travaux).

Cep : consommation conventionnelle annuelle d'énergie primaire du bâtiment pour les postes de consommation de chauffage, de refroidissement, de production d'eau chaude sanitaire, de leurs auxiliaires, de ventilation et d'éclairage.

Climatisation : traitement de l'air gérant ses différentes conditions, dont notamment sa température et son humidité (contrairement au rafraîchissement qui n'agit que sur la température).

ECS : eau chaude sanitaire.

PAC : pompe à chaleur.

Rafraîchissement : système abaissant uniquement la température de l'air (contrairement à la climatisation).

RT : réglementation thermique (sachant que seule la RT 2005 est concernée dans ce document).

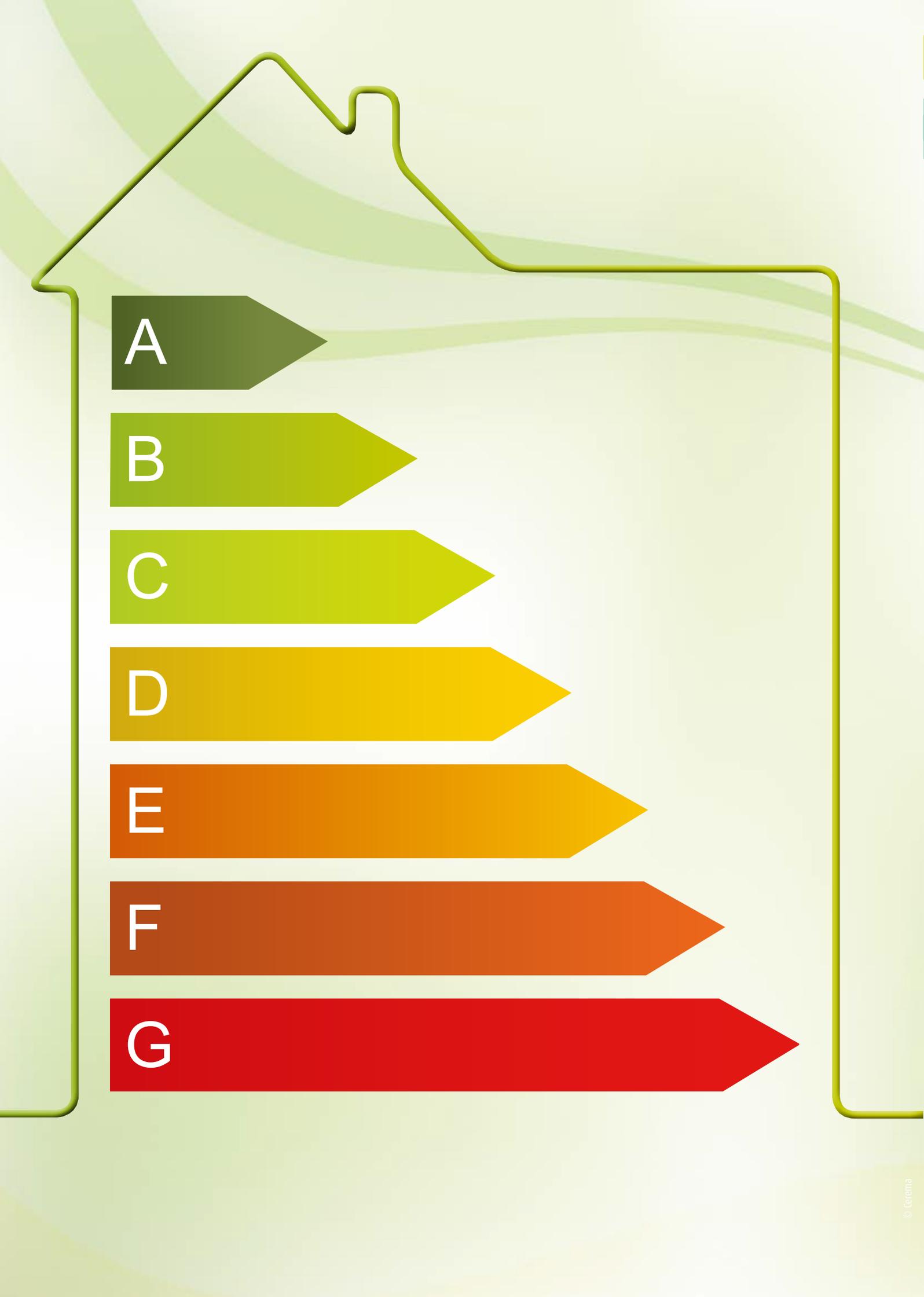
Usage : utilisation réelle du bâtiment dans les conditions concernées d'aménagement des lieux, de moment et de personnes en présence.

Pour les significations différentes, au sens de la réglementation thermique, les termes suivants peuvent être employés :

- **fonction** du bâtiment, ou **destination d'usage**, pour « l'usage du bâtiment » (habitation, hébergement, restauration, bureaux, accueil de la petite enfance, établissement sportif, établissement de santé...);
- **poste de consommation** pour « l'usage de l'énergie » (au nombre de cinq dans la réglementation thermique : chauffage, production d'eau chaude sanitaire, refroidissement, éclairage et auxiliaires de chauffage, d'ECS et de ventilation).

VMC : ventilation mécanique contrôlée.

Watt crête (Wc) : Le Watt crête est une unité de mesure représentant la puissance maximale d'un dispositif. Pour une installation photovoltaïque, le Watt crête caractérise la puissance électrique maximale pouvant être fournie dans des conditions standard, notamment d'une irradiation de 1 000 W/m².

A diagram of an energy efficiency scale. It features a green outline of a house at the top. Below the house, seven horizontal arrows of increasing length and increasing color intensity from dark green to red are stacked vertically. Each arrow is labeled with a letter from A to G. The background has light green wavy patterns.

A

B

C

D

E

F

G



CONVENTIONS DE PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Dans ce document, les **consommations** sont données en **énergie primaire et par surface hors œuvre nette (SHON)**, sauf indication contraire: $(\text{kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2_{\text{SHON}}.\text{an})$.

Pour simplifier, cette unité sera notée: **$\text{kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2.\text{an}$** .

Les coefficients de conversion en énergie primaire retenus sont de 2,58 pour l'électricité et de 1 pour les autres énergies.

De manière générale, les **surfaces** (en m^2) sont par défaut en SHON.

Méthode de calcul réglementaire Th-CE 2005 (ou, en raccourci, *méthode Th-CE 2005*): méthode de calcul thermique des bâtiments neufs utilisée obligatoirement lors de la construction de bâtiments neufs soumis à la réglementation thermique (RT) de 2005 en France métropolitaine.

Les différentes natures de données de consommation

 **Consommation de l'étude thermique réglementaire:** résultat du calcul d'énergie primaire consommée en phase d'utilisation du bâtiment objet de la demande de permis de construire, suivant *la méthode de calcul réglementaire Th-CE 2005*.

 **Consommation recalculée avec le paramètre constaté:** consommation calculée suivant *la méthode de calcul réglementaire Th-CE 2005*, excepté pour le paramètre analysé qui est remplacé par sa valeur mesurée (ou déduite des mesures et, le cas échéant, des enquêtes auprès des occupants).

Pour l'analyse d'une opération donnée, sont distingués les deux recalculs suivants (Méthode § 4):

-  • consommation recalculée suivant la météo et l'occupation observées;
-  • consommation recalculée suivant la météo, l'occupation et les performances observées.

 **Consommation mesurée:** consommation d'énergie mesurée par le dispositif expérimental propre à l'évaluation.

Les considérations humaines

Dans les chapitres relatifs aux équipements, les considérations humaines sont mises en évidence comme suit :



pour l'impact des pratiques ;



pour le confort thermique et la qualité d'usage.

La numérotation des bâtiments

Pour faciliter la compréhension des histogrammes ou autres graphiques faisant apparaître différents bâtiments, enrichir leur analyse et permettre les comparaisons, les bâtiments sont identifiés par un **numéro unique**, qui intègre les quatre informations généralement les plus utiles.

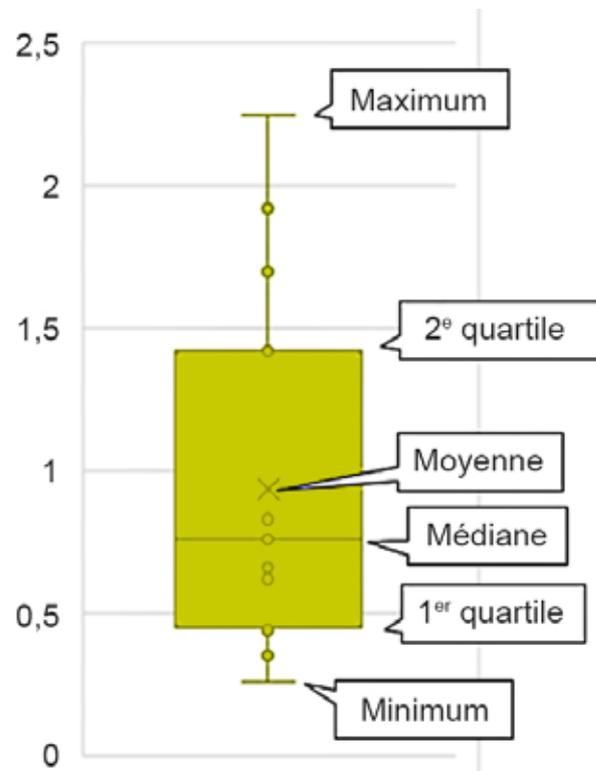
Chaque bâtiment est ainsi **numéroté dans sa fonction**, puis complété de sa **zone géographique**, de la **nature des travaux** et du **niveau de performance énergétique** initialement visé, avec la nomenclature suivante :

Code	Signification
1. Fonction du bâtiment	
MI	Maison Individuelle (diffus ou groupé)
LC	Habitat collectif [= Logement Collectif]
Bu	Bureau
En	Enseignement (école, crèche...)
He	Hébergement (personnes âgées, EHPAD, foyer, hôtel, gîte...)
Re	Restauration
Sa	Santé (hôpital, centre médical...)
Cu	Culture (bibliothèque, salle des fêtes...)
Sp	Sport
Co	Commerce
Mu	Mixte [= Multi-fonction]
2. Numéro d'ordre	
01, 02, 03...	
3. Zone climatique	
H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d, H3	Nomenclature RT 2000
4. Nature des travaux	
N	Neuf
R	Rénovation
5. Niveau de performance énergétique visé	
++	> 40 % de gain par rapport au niveau du label BBC
+	De 20 à 40 % de gain par rapport au niveau du label BBC
=	Niveau du label BBC à ± 20 %
-	Consommation supérieure de plus de 20 % au niveau du label BBC
x	Information manquante (si besoin)

Exemple: Bu08.H2b.N.- signifie qu'il s'agit du bâtiment de bureaux n° 8, en zone H2b, neuf et avec un niveau de performance à + 20 % de consommation visée par rapport au niveau du label BBC.

La représentation en « boîte à moustache »

Elle permet de représenter en un seul graphique plusieurs grandeurs statistiques pour un même paramètre, notamment : sa moyenne, son minimum et son maximum.



© 2017 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement durable des territoires.

Le Cerema est un établissement public, créé en 2014 pour apporter un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (article L.122-4 du code de la propriété intellectuelle). Cette reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et L.335-3 du CPI.

Coordination maquettage : service éditions Cerema Territoires et ville (B. Daval)

Maquettage et mise en page : Cerema Centre-Est (F. Berland)

Photo couverture : Cerema - architecte : Carbone 27

Dépôt légal : octobre 2017

ISBN : 978-2-37180-206-3 (pdf)

ISSN : 2417-9701

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69 674 Bron Cedex

Bureau de vente

Cerema / Direction technique Territoires et ville

2 rue Antoine Charial

CS 33927

69 426 Lyon Cedex 03 – France

Tél. : 04 72 74 59 59 – Fax. 04 72 74 57 80

www.cerema.fr Rubrique « Nos éditions »
catalogue.territoires-ville.cerema.fr

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie

Enseignements opérationnels tirés de 119 constructions et rénovations du programme PREBAT – 2012-2016

Plus de 200 bâtiments à basse consommation d'énergie, construits ou rénovés depuis 2006, ont été instrumentés pour mesurer leur performance énergétique et leur confort thermique. Actuellement, 119 d'entre eux ont été évalués et permettent de tirer les premiers enseignements sur les consommations réelles, l'influence des conditions météorologiques et d'occupation, les performances du bâti et des équipements techniques, le confort thermique et la qualité d'usage, les coûts, mais aussi l'importance qu'ont maintenant les pratiques de pilotage et d'utilisation dans la maîtrise des consommations et le confort d'été.

Sur le même thème

Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie

Enseignements opérationnels

Évaluations 2012-2016

Fiche de synthèse

2017

Réduire l'impact environnemental des bâtiments

Agir avec les occupants

2013

Prise en compte des usages dans la gestion patrimoniale des bâtiments : expériences internationales

Série de fiches

En téléchargement gratuit sur : catalogue.territoires-ville.cerema.fr

Aménagement et développement des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

ISSN: 2417-9701

ISBN: 978-2-37180-206-3



Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement – www.cerema.fr

Cerema Territoires et ville: 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - F-69426 Lyon Cedex 03 - Tél. +33 (0)4 72 74 58 00

Siège social: Cité des mobilités – 25, avenue François-Mitterrand – CS 92 803 – F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30