Cerema

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie

Enseignements opérationnels tirés de 60 constructions et rénovations du programme PREBAT

2012 - 2015

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

MINISTÈRE DU LOGEMENT, DE L'ÉGALITÉ DES TERRITOIRES ET DE LA RURALITÉ

Collection | Connaissances

Cerema

Direction technique Territoires et ville

Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie

Enseignements opérationnels tirés de 60 constructions et rénovations du programme PREBAT 2012 - 2015

Décembre 2015

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
Direction technique Territoires et ville
2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03 - www.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.

Dans le cadre de la capitalisation-exploitation-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 l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère du Logement, de l'Égalité des territoires et de la ruralité ;
- 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 centre d'études sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema).

Remerciements

Cet ouvrage a été rédigé par le Cerema à la demande de la DGALN du ministère de l'écologie et de l'ADEME.

Il a pour objet de présenter les enseignements issus de la capitalisation des 60 premières évaluations d'opérations instrumentées du PREBAT, mesurant leur performance énergétique et le confort thermique.

Cet ouvrage collectif a été dirigé par Pascal Cheippe (Cerema – Territoires et ville) dans le cadre du groupe de travail comprenant Fabien Auriat (DGALN), Florian Piton (ADEME), Pierrick Nussbaumer (Cerema – Est), Jean-Alain Bouchet (Cerema – Méditerranée) 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), Myriam Humbert (Ouest), Laurent Laloge (Territoires et ville), Constance Lancelle (Ouest), François Marconot (île-de-France), Bassam Moujalled (Sud-Ouest), Pierrick Nussbaumer (Est) et Jamel Roudani (Centre-Est) ;
- à l'Université de Tours : Christèle Assegond et Jean-Philippe Fouquet (sociologues).

en tant que relecteurs :

- Fabien Auriat et Florent Moretti (DGALN) ;
- Florian Piton (ADEME) ;
- Jean-Robert Millet (CSTB) ;
- Muriel Dupret (Enertech) ;
- Julien Burgholzer (Cerema - Est) ;
- 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 13

Méthode d'évaluation des performances énergétiques et du confort 15

1. Une méthode tournée vers la caractérisation *in situ* et l'explication des écarts de consommation 15
2. Différents objectifs d'évaluation basés sur les mesures 16
3. Une méthode de suivi associant mesure, observation et enquête 16
4. Une méthode spécifique d'analyse des écarts entre consommation mesurée et consommation de l'étude thermique 17

1 Consommations et productions mesurées 21

1.1 Répartition des postes de consommation 22
1.2 Évolution des consommations les premières années de suivi 30
1.3 Production d'électricité photovoltaïque 32

2 Conditions météorologiques 35

2.1 Influence des paramètres météorologiques 36
2.2 Niveaux de température extérieure hivernale 37
2.3 Impact sur la consommation de chauffage 38

3 Conditions d'occupation 41
3.1 Température de chauffage 42
3.2 Apports internes 46
3.3 Combinaison des conditions météorologiques et d'occupation 51

4 Performances énergétiques du bâti 53
4.1 Caractéristiques des enveloppes de l'échantillon 54
4.2 Conception bioclimatique 58
4.3 Isolation thermique de l'enveloppe 60
4.4 Perméabilité à l'air de l'enveloppe 64

5 Performances énergétiques des systèmes techniques 67
5.1 Chauffage 68
5.2 Eau chaude sanitaire 74
5.3 Ventilation 79
5.4 Auxiliaires 84
5.5 Refroidissement 85
5.6 Éclairage 86
5.7 Autres équipements immobiliers 90
5.8 Équipements mobiliers 93

6 Performances d'ensemble du bâtiment 99
6.1 Performances attendues et mesurées 100
6.2 Explication des écarts constatés 101

7 Pratiques des acteurs 105
7.1 Acteurs de la construction-rénovation 106
7.2 Des acteurs de la construction à ceux de l'utilisation 108

8 Confort thermique et qualité d'usage 111
8.1 Satisfaction des occupants et confort perçu 112
8.2 Confort thermique d'hiver 113
8.3 Confort thermique d'été 114
8.4 Confort thermique de mi-saison 121

Conclusion 122

Annexes - Détail de la méthode d'évaluation mise en œuvre par le Cerema 125

A.1 Conditions météorologiques de l'année de suivi 125
A.2 Conditions d'occupation de l'année de suivi 125
A.3 Caractérisation de la performance de l'enveloppe 129
A.4 Caractérisation de la performance des systèmes 132
A.5 Analyse du confort thermique 136

Table des matières 139

Glossaire et abréviations 143

Conventions de présentation des consommations 145

© Arnaud Bouissou/MEDDE-MLETR / Architecte : Charon-Rampillon Promoteur : LFI

INTRODUCTION

Parmi les 3 000 bâtiments à basse consommation lauréats du programme « Bâtiments démonstrateurs », plus de 200 ont été instrumentés pour mesurer leur performance énergétique et le confort thermique. Actuellement, 60 d'entre-eux ont été évalués et permettent de tirer les premiers 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.

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, qui présentent des ensembles de solutions architecturales, techniques et financières très performantes.

Parmi eux, plus de 200 bâtiments ont été instrumentés pour mesurer leur performance énergétique sur deux ans. Par ailleurs, les **suivis-évaluations** comportaient un volet d'observation 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 achevée. 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 Enertech, Omegawatt, Adret, Costic, 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.

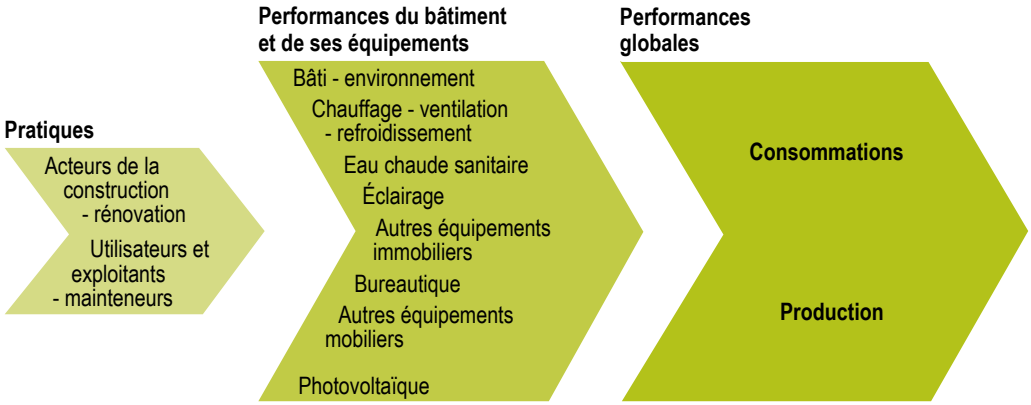
Cette capitalisation est consolidée chaque année au fil de l'augmentation de la taille de l'échantillon des opérations évaluées, avec production d'un rapport. Mais elle s'inscrit d'ores et déjà dans une cohérence finale d'ensemble, structurée par objectifs.

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.

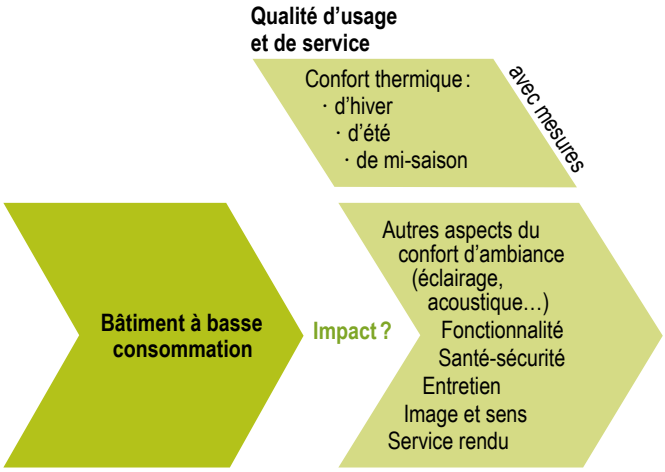
Elle a donc pour but de tirer des enseignements qui permettent d'améliorer principalement la **performance énergétique** de leurs bâtiments, tant sur le plan technique, des performances par composant aux performances plus globales, que sur les pratiques des acteurs (cf. Illustration 1).

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 à basse consommation (cf. Illustration 2), avec approfondissement du confort thermique (mesures) et mise en évidence de l'impact que peut avoir le 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.

Toutefois, au stade actuel, la capitalisation ne bénéficie pas encore de toutes les données ou de données en nombre suffisant pour en tirer des enseignements sur l'ensemble des objectifs visés.

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 présente capitalisation 2015 compte maintenant **60 évaluations réalisées de 2012 à 2015**. Elle traite 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.

Le nombre d'opérations concernées diminue 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 sont plus particulièrement à relativiser compte tenu de la faible taille de leurs échantillons actuels.

Les équipements du bâtiment sont traités au travers de résultats quantitatifs, mais aussi qualitatifs.

L'**impact des pratiques** des acteurs commence à bénéficier d'enseignements, tant globaux que spécifiques à certains équipements.

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 approfondissement des situations en été et traitement des situations en mi-saison.

Pratiques et usages 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 ne commencera à être traitée que dans la capitalisation 2016, stabilisant alors l'étendue des thèmes capitalisés.

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 60 suivis-évaluations de l'échantillon 2015 :

- 19 ont été réalisés par des bureaux d'études, avec des méthodes variées ;
- 41 ont été effectués par les directions territoriales du Cerema (ex-CETE[1]), avec utilisation du moteur de calcul dynamique et réglementaire Th-CE 2005 pour faire des simulations comparatives.

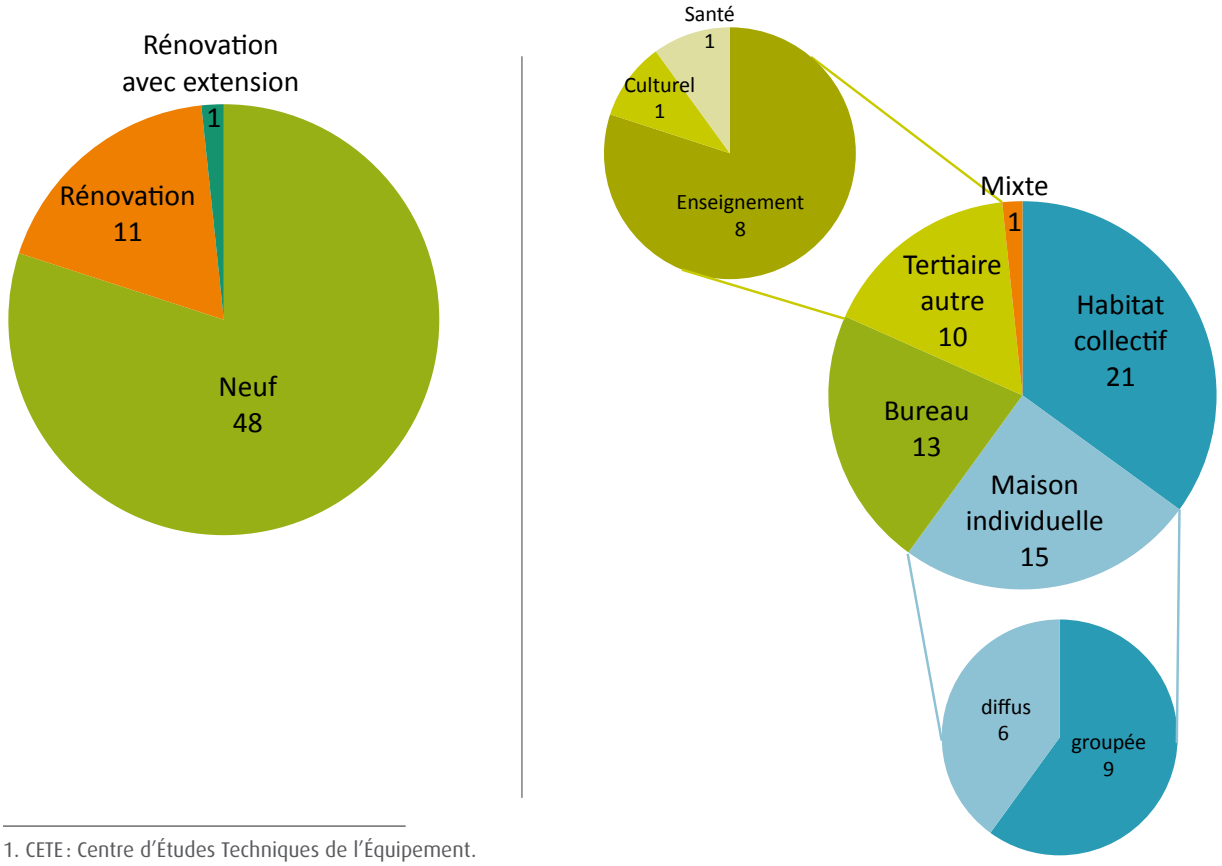
> Du fait de leur date de construction, les bâtiments étudiés ont été **soumis à la RT 2005** (et non à la RT 2012) ou à la RT des bâtiments existants.
>
> D'où l'utilisation du moteur de calcul dynamique de la RT 2005 pour les analyses dans les suivis-évaluations du Cerema.

Les **mesures** ont été réalisées sur 2 ans **entre début 2009 et début 2014**.

Cet échantillon couvre un ensemble varié de **types de bâtiment,** tant dans la nature de leurs 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 (80 %) ;
- et d'habitat (60 %).

Illustration 3 – L'échantillon en natures de travaux et fonctions représentées[2] (en nombre d'opérations)



1. CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement.
2. L'opération mixte est un habitat collectif avec commerces.

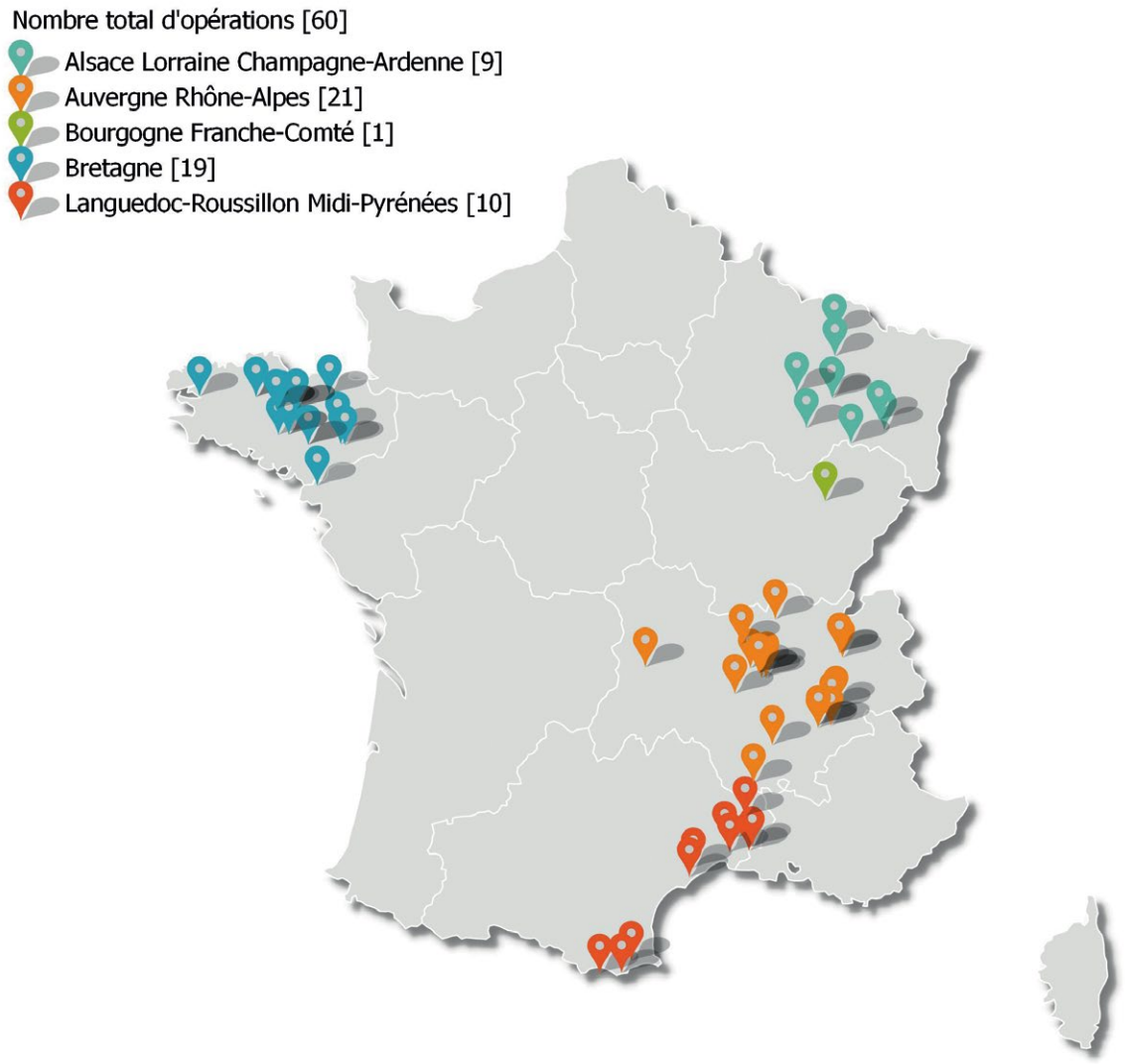
Les surfaces hors œuvre nette (SHON) des bâtiments s'étendent de 60 m² pour une maison individuelle à 5 700 m² pour un bâtiment de bureau.

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

La **répartition géographique** de l'échantillon est loin d'être uniforme sur le territoire, avec des implantations en Bretagne, Lorraine, Rhône-Alpes et Languedoc-Roussillon (ainsi qu'une opération en Auvergne et une autre en Franche-Comté), mais :

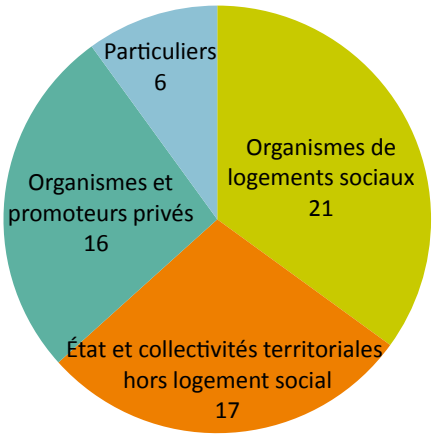
- les opérations sont réparties en zone urbaine, péri-urbaine, rurale et isolée (5 bâtiments) ;
- les zones climatiques représentées sont variées ;
- et différentes altitudes sont concernées, 2/3 des opérations étant toutefois situées en plaine et 8 % en montagne.

Illustration 4 – Répartition géographique de l'échantillon



Concernant les natures des **maîtres d'ouvrage**, l'échantillon comprend 1/3 de bailleurs sociaux (avec essentiellement de l'habitat collectif), 1/4 de promoteurs privés (avec principalement de l'habitat individuel diffus) et 1/4 de constructions publiques.

Illustration 5 – Les différentes natures de maîtres d'ouvrage de l'échantillon (en nombre d'opérations)



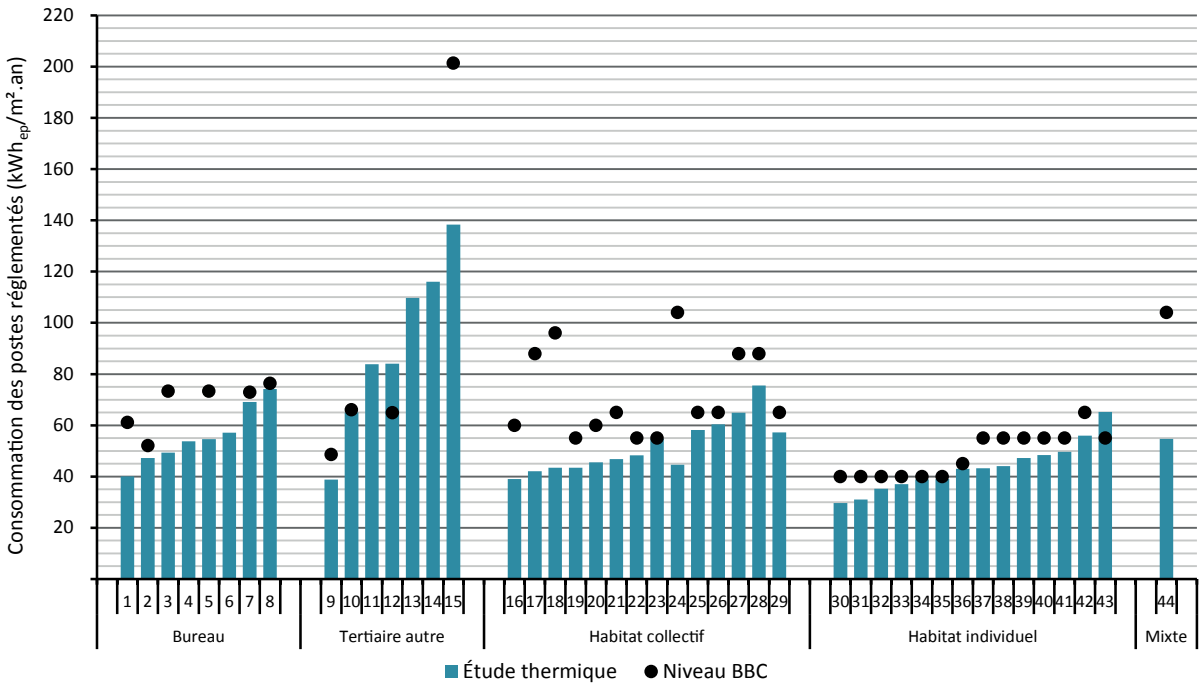
Dans l'échantillon étudié, l'habitat collectif, essentiellement social, utilise des **techniques** traditionnelles, telles que la structure béton ou la maçonnerie, l'isolation par laines minérales ou plastiques alvéolaires et le chauffage par chaudières gaz à condensation.

Concernant les bâtiments d'enseignement ou culturels, 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.

Enfin, parmi les bâtiments de bureaux, majoritairement portés par des promoteurs privés, on rencontre de la structure bois, de l'isolation en ouate de cellulose et du chauffage par pompe à chaleur. Pour plusieurs opérations, des isolants bio-sourcés ont été choisis (ex. : paille de blé, paille de riz).

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



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, **toutes les consommations** sont données en **énergie primaire**, sauf indication contraire, et **toujours par surface hors œuvre nette** (kWh_{ep} / m^2_{SHON} / an). Pour simplifier, cette unité sera notée : **$kWh_{ep}/m^2.an$**.

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

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 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 (cf. 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.

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 condition réelle d'utilisation, ainsi que les premiers enseignements à destination des acteurs.

WEATHER STATION
Microsoft Excel - outil_Interprétation_v11P9_permea.xls
Consommations mesurées
Tableau bilan
Chauffage
ECS
Auxiliaires de ventilation
autre auxiliaire
Eclairage
Refroidissement
Production photovol
Comparaison des consommations
LG
acer
onset
HOBO
esc
yes
no

© Cerema

Pour les deux tiers des opérations suivies par les directions territoriales du Cerema, les évaluations disposent d'apports supplémentaires par rapport à celles 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 (cf. § 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 (cf. § 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 intérieure en période d'occupation, en utilisant plusieurs indicateurs de confort (cf. § A.5). 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 la consommation 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, de l'eau chaude sanitaire, des consommations d'électricité, d'éclairage, des ventilateurs et auxiliaires.

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 (cf. § 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 météorologiques 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).

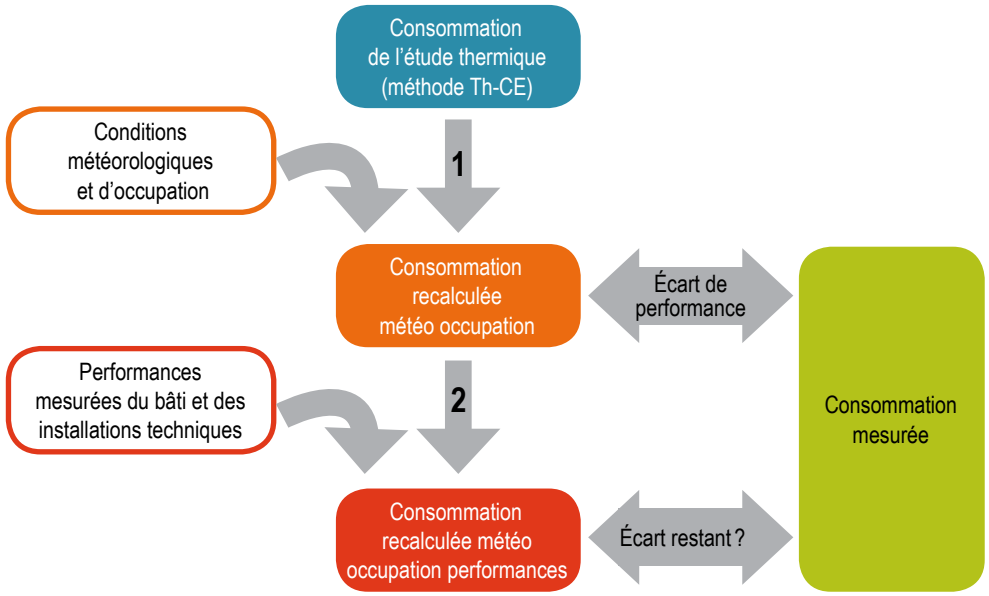
Toutefois, certaines caractéristiques de l'étude thermique, telles que la perméabilité à l'air, sont celles prises en compte comme objectif, pour être comparées aux valeurs réelles mesurées à la réception.

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 »[3]. 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.

3. Le moteur « faisabilité » est basé sur le moteur de calcul Th-CE 2005 avec certaines données conventionnelles ouvertes, tels les scénarios d'occupation et les apports internes ou le volume d'ECS puisé.

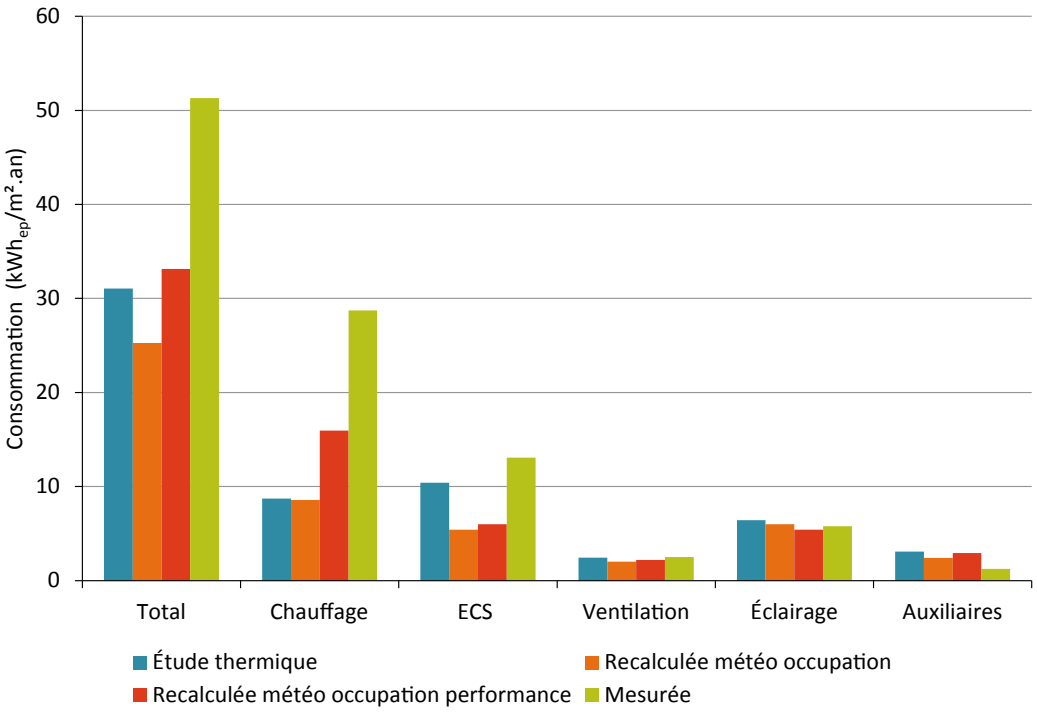
Illustration 7 – Comparaisons entre consommation mesurée et consommations recalculées de l'étude thermique réglementaire



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

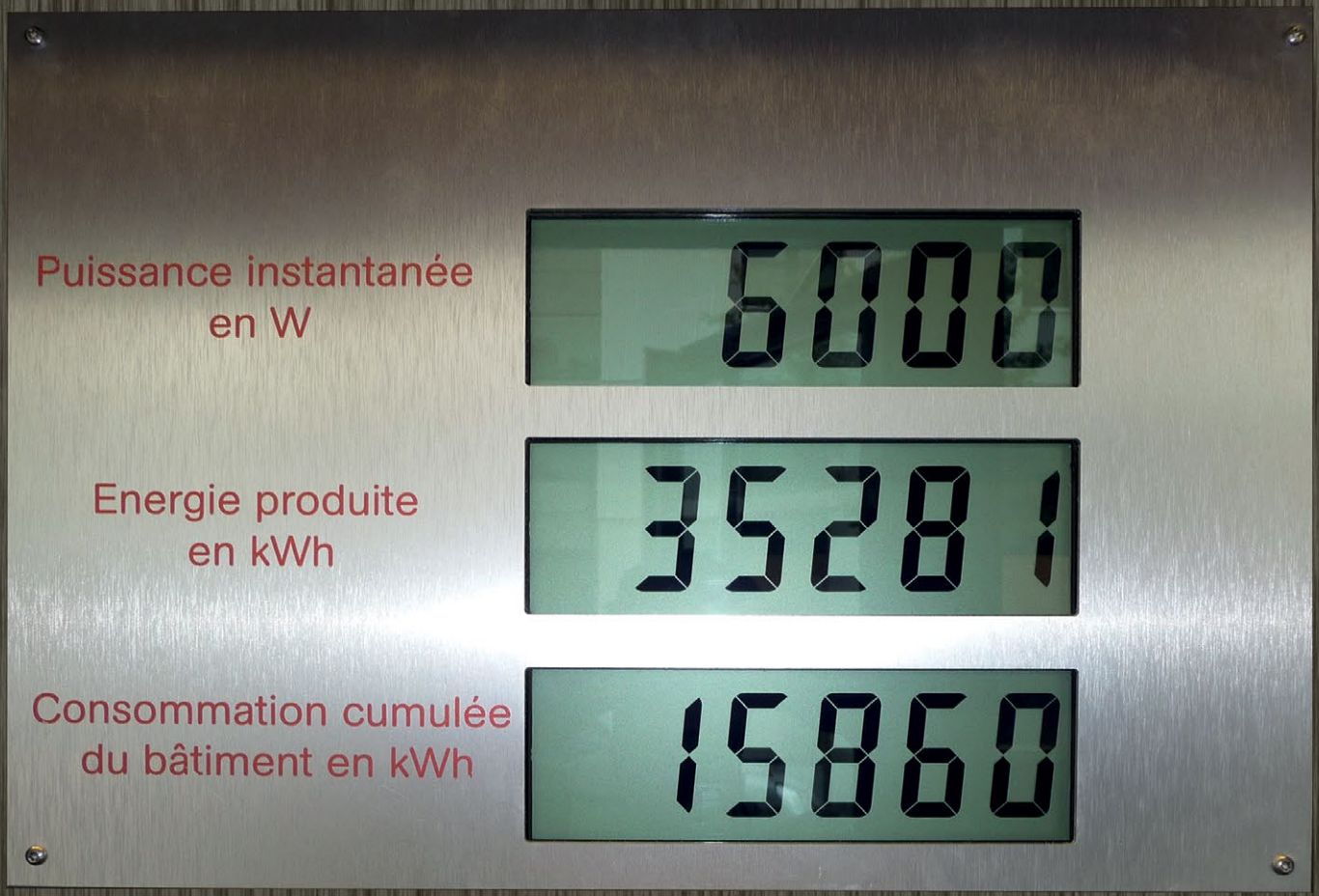
Illustration 8 – Exemple de comparaison des Cep calculées, recalculées et mesurées



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 intérieures et extérieures 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'enquête 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.


Puissance instantanée
en W
6000
Energie produite
en kWh
35281
Consommation cumulée
du bâtiment en kWh
15860

© Cerema

1

Consommations et productions mesurées

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 ceux 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 avec celle des postes réglementés.

La consommation des cinq postes réglementés peut varier de 20 à 220 kWh_{ep}/m^2. an selon les opérations, mais une plus grande homogénéité est logiquement constatée par destination d'usage. 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.

Une tendance à la baisse de consommation est également observée entre les deux premières années suivies.

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 ».

1.1 Répartition des postes de consommation

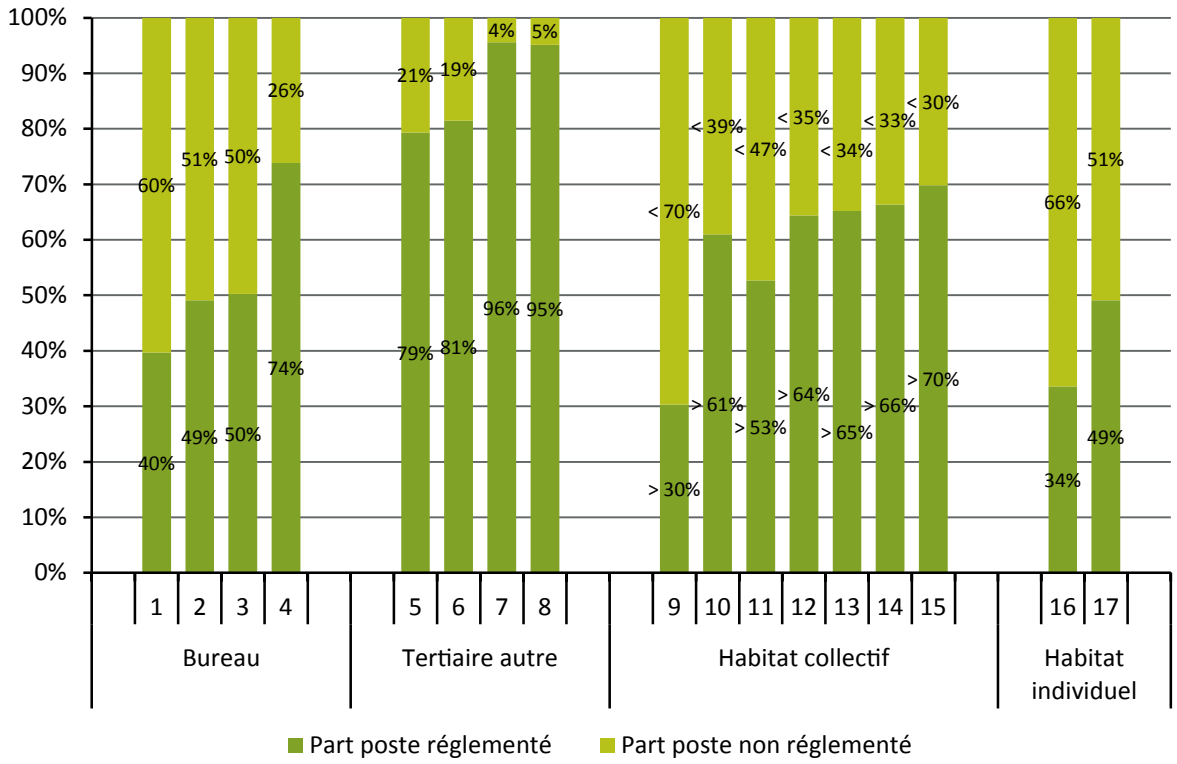
La consommation totale comprend :

- les postes de consommation réglementés : chauffage, refroidissement, production d'eau chaude sanitaire, auxiliaires des systèmes thermiques, auxiliaires de ventilation et 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…), quasi totalement à l'électricité[4], appelés également « **électricité spécifique** »[5].

1.1.1 Une part importante des postes non réglementés

La consommation mesurée des postes non réglementés de notre échantillon se situe généralement **entre 50 et 90 kWh$_{ep}$/m².an** (cf. illustration 10) et représente **1/3 à la moitié de la consommation totale** (cf. illustration 9), excepté pour les écoles et crèches (tertiaire autre que de bureau sur le graphique) où elle est plus faible (10 à 20 kWh$_{ep}$/m².an et 5 à 20 % de la consommation totale).

Illustration 9 – Parts des postes réglementés et non réglementés dans la consommation totale mesurée

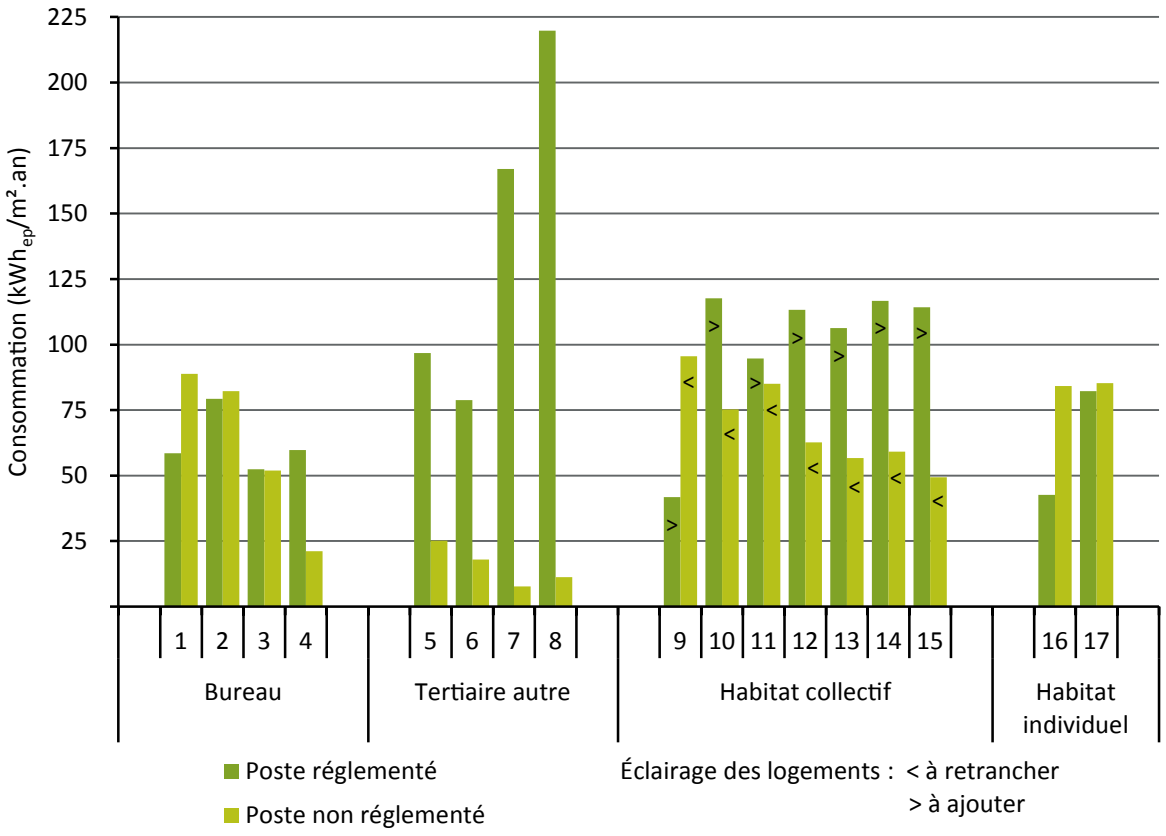


4. Car, mis à part le gaz pour la cuisson, les autres sources d'énergie ne sont pas utilisées pour ces équipements dans notre échantillon de bâtiments.
5. Par différenciation avec l'énergie électrique consommée par l'éclairage et les équipements thermiques et leurs auxiliaires, soumise à la réglementation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

Pour les bâtiments de **bureaux** et les deux 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 ses serveurs informatiques (cf. § 5.8 et l'illustration 60).

En **habitat collectif** la part des postes non réglementés représente environ 1/3 des consommations totales et se situe entre 50 et 90 $kWh_{ep}/m^2.an$. Ces consommations sont principalement concentrées dans les parties privatives et leurs équipements mobiliers (cf. § 5.8.5).

Illustration 10 – Consommations mesurées des postes réglementés et non réglementés



À retenir

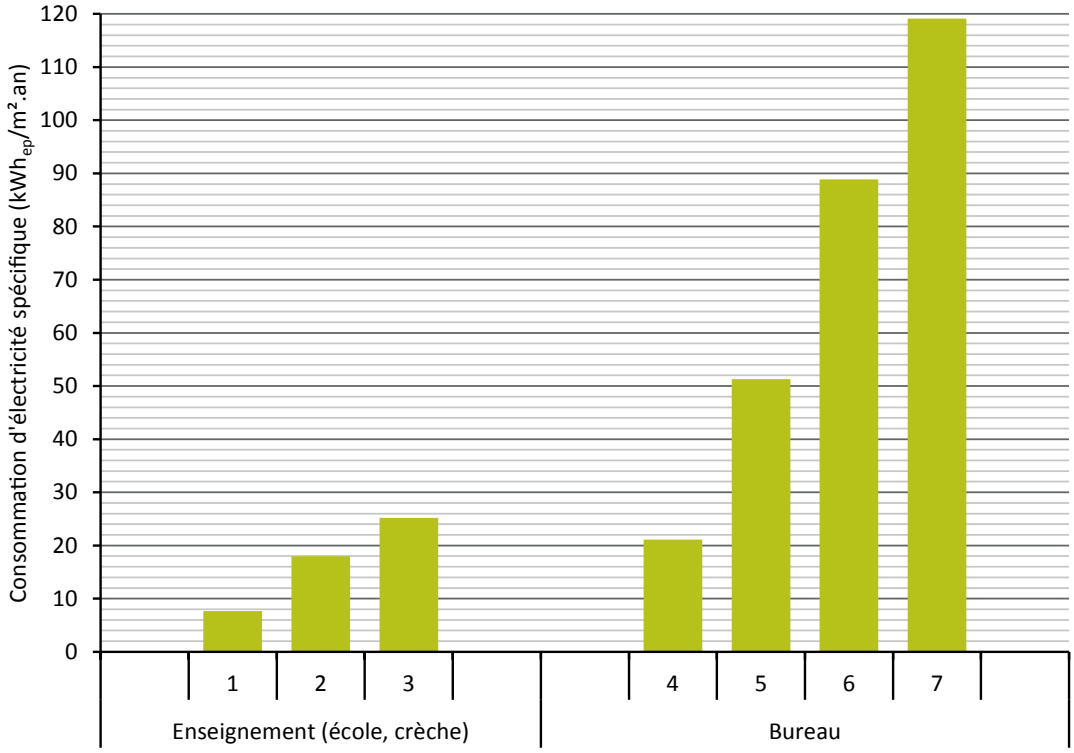
Pour les **bâtiments d'habitation et de bureau** à basse consommation, la **part prise par les postes non réglementés** est importante, généralement **entre 50 et 90 $kWh_{ep}/m^2.an$**. Elle est **équivalente à celle des postes réglementés** en tertiaire de **bureaux**, et à sa moitié en **habitat collectif** (en énergie primaire).

Beaucoup de variations s'expliquent par l'usage, de par les 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, le graphique suivant montre très clairement que le gisement potentiel d'économie est plus important dans les bâtiments de bureaux, par rapport au domaine de l'enseignement, avec une consommation qui peut monter à 120 $kWh_{ep}/m^2.an$, mais aussi descendre à 20 $kWh_{ep}/m^2.an$ dans le meilleur des cas.

Illustration 11 – Consommation mesurée d'électricité des postes non réglementés



En effet, dans le cas du bâtiment de bureaux n° 4, la consommation électrique a pu atteindre 20 $kWh_{ep}/m^2.an$ grâce à une conception particulièrement attentive aux consommations et impliquant l'organisation bureautique, ainsi qu'à la vigilance des utilisateurs.

À retenir

Pour les bâtiments de bureaux à basse consommation, les postes non réglementés constituent une part importante, fortement variable en fonction de la conception, de l'organisation bureautique et des pratiques des utilisateurs.

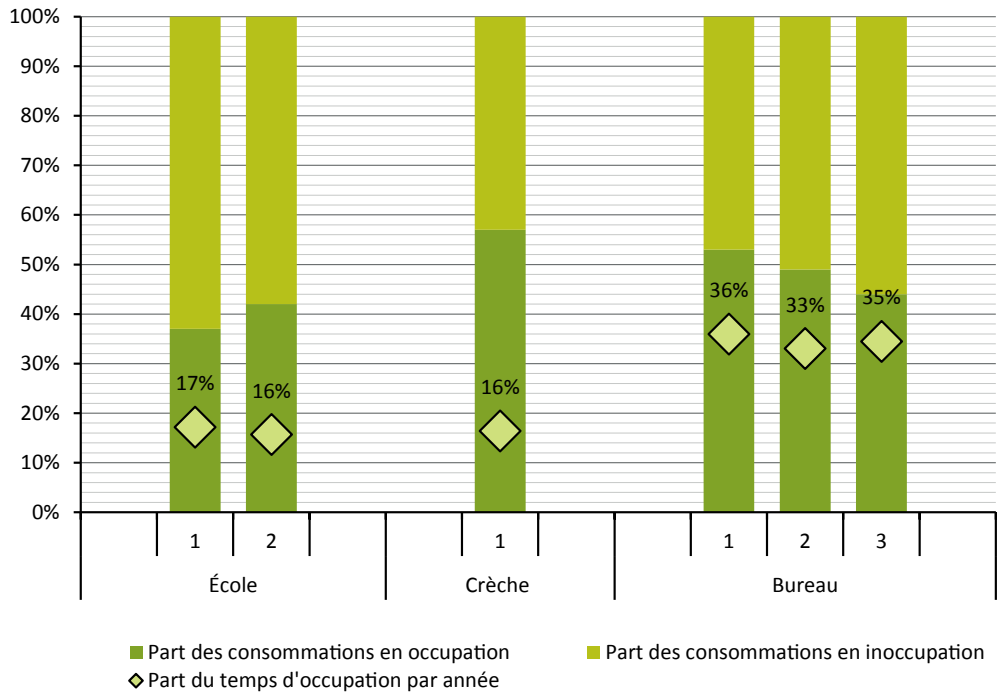
Pour les postes non réglementés, les appareils et les durées d'utilisation sont beaucoup plus variables en fonction des destinations d'usage, et des pratiques des utilisateurs, à l'image, en habitat, de la variété d'équipement des ménages (électroménager, audiovisuel et informatique) et de leurs durées 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 consommations sont détaillés en § 5.8.

Le graphique suivant donne les résultats des mesures sur trois bâtiments de bureaux, deux écoles et une crèche, de 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 12 – Répartition des consommations électriques par périodes d'occupation et d'inoccupation et part du temps d'occupation



50 % de la consommation annuelle des bureaux a lieu lorsqu'ils ne sont pas occupés, soit pendant les deux tiers du temps. Les serveurs fonctionnant en continu et la bureautique non optimisée en sont les raisons principales. 60 % de la consommation annuelle des écoles a lieu lorsqu'elles ne sont pas occupées, soit pendant 85 % du temps ; ce qui est élevé au regard de leur usage, sans serveurs ou autres équipements devant fonctionner en continu. Dans plusieurs cas, c'est l'éclairage extérieur qui est en cause.

À retenir

Les consommations électriques totales en période d'inoccupation des bâtiments tertiaires sont très élevées. Elles varient de 50 % de la consommation annuelle pour les bureaux, à 60 % pour les écoles.

Parmi les différents appareils en fonctionnement, nombreux sont ceux qui pourraient être arrêtés en période d'inoccupation.

Pour un bâtiment de bureau en Rhône-Alpes :

> *« La moitié des consommations électriques, tous usages confondus, a lieu en dehors des périodes d'occupation. Et la plupart pourraient être évitées en arrêtant les appareils. »*

Des abonnements électriques surdimensionnés

Une campagne de mesure a permis de déterminer la **puissance maximale appelée** et de la comparer à la puissance souscrite dans 2 écoles, 1 crèche, 2 bureaux, ainsi que dans 5 logements d'un immeuble collectif.

Illustration 13 – Puissance souscrite et puissance maximale atteinte en tertiaire

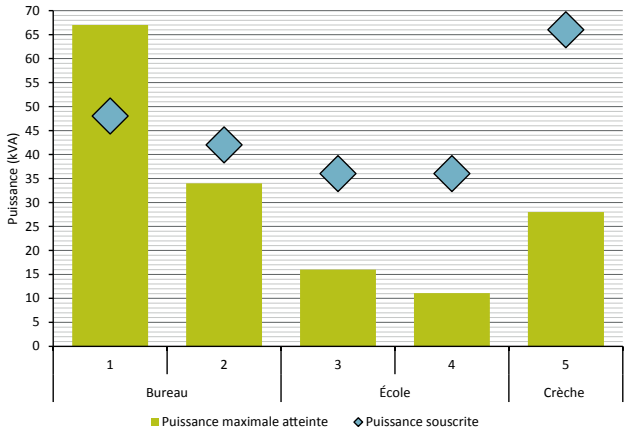
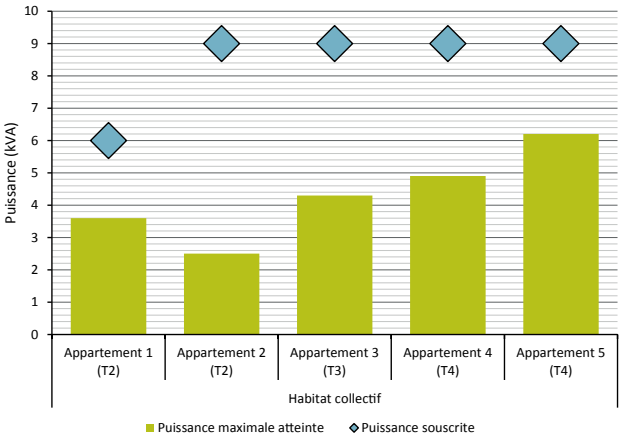


Illustration 14 – Puissance souscrite et puissance maximale atteinte en habitat



Nous constatons que la puissance souscrite est bien dimensionnée pour les deux bureaux (pour le bureau n° 1, la puissance appelée ne dépasse que très ponctuellement la puissance souscrite).

En revanche la puissance souscrite dans les écoles et crèches est systématiquement surdimensionnée.

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

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, entre 6 et 9 kVA pour des T3 et T4 en fonction des équipements des occupants.

Cette surpuissance engendre des surcoûts de fonctionnement et peut engendrer un surinvestissement.

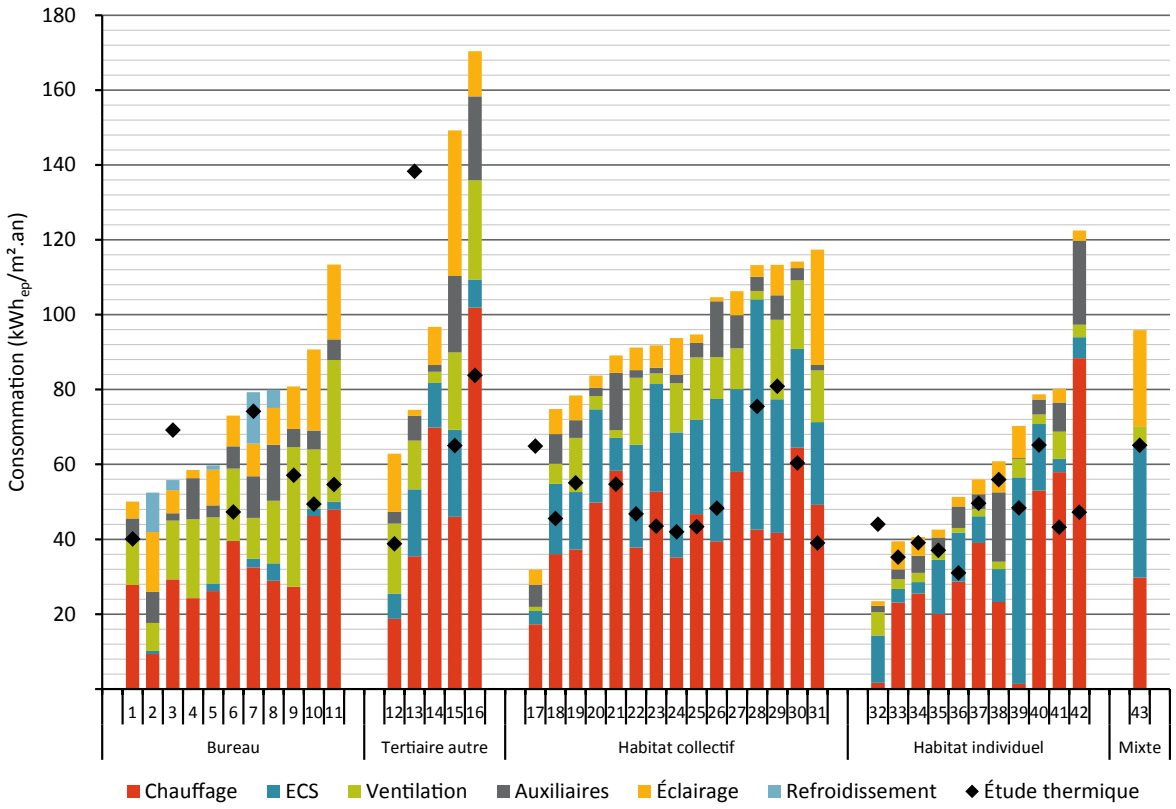
À retenir

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

1.1.2 Une répartition des postes réglementés en évolution

La consommation totale des **cinq postes réglementés** varie **entre 20 et 220 kWh$_{ep}$/m².an**, comme l'indiquent les illustrations 10 et 15 (qui ne comportent pas tout à fait les mêmes opérations). Sa décomposition par poste est donnée en valeur absolue et en pourcentage, dans les graphiques 15 et 16 ci-après.

Illustration 15 – Répartition en valeurs de la consommation mesurée des postes réglementés[6] et valeur de l'étude thermique réglementaire



Nous pourrions observer au travers de l'illustration 15 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, tels la météo et l'occupation ; toute analyse nécessite de prendre en compte ces paramètres. Les paramètres explicatifs des consommations sont étudiés un à un dans les chapitres suivants et une comparaison de la consommation mesurée avec l'objectif de conception lors de l'étude thermique réglementaire est effectuée au chapitre 6.

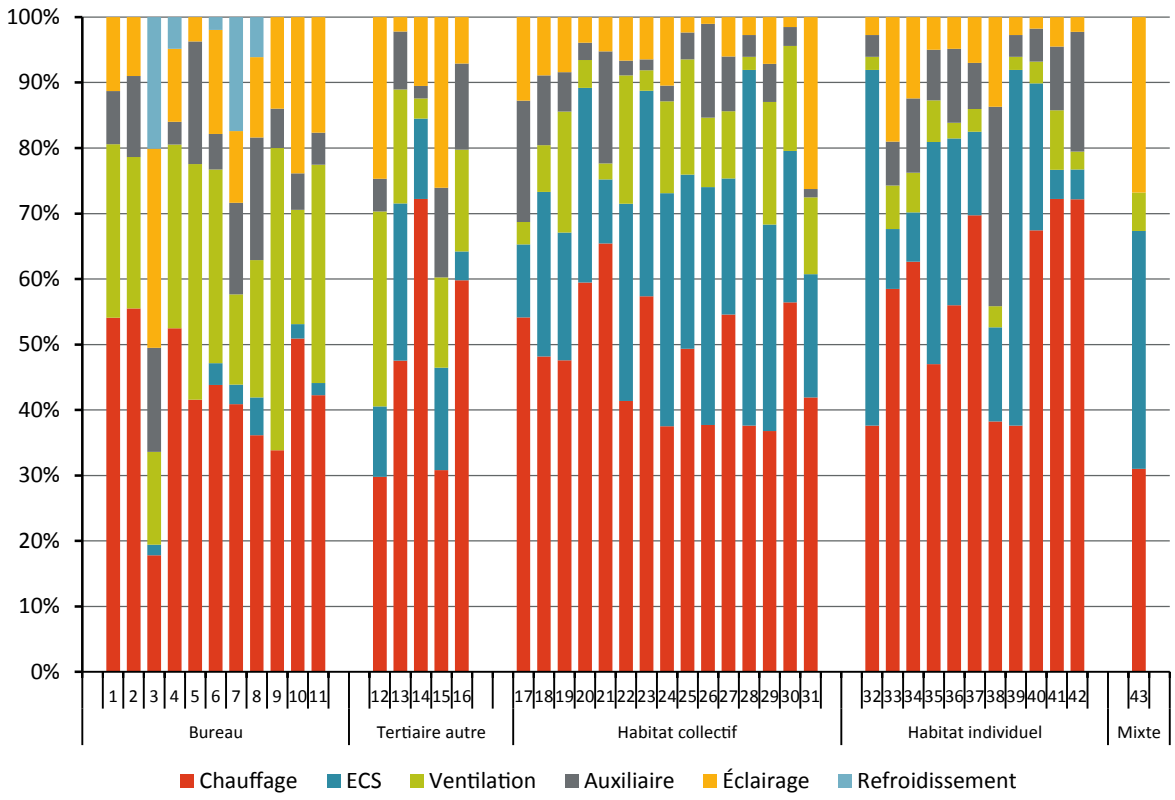
6. Le poste « chauffage » inclut parfois les auxiliaires.
Le poste « ECS » n'a pas toujours été renseigné pour les bureaux. Toutefois, ce poste est généralement très faible pour ce type de fonction.
En habitat collectif, le poste « éclairage » ne comprend pas toujours la consommation à l'intérieur des logements (mesure uniquement des parties communes).

À retenir

La **consommation totale des cinq postes réglementés** varie de 20 à 220 $kWh_{ep}/m^2.an$ (extrêmes compris), avec la répartition suivante par destination d'usage (hors extrêmes) :

- de 50 à 90 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour les bureaux ;
- de 70 à 170 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour les autres bâtiments tertiaires ;
- de 70 à 110 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour l'habitat collectif ;
- de 40 à 80 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour l'habitat individuel.

Illustration 16 – Répartition en pourcentage de la consommation mesurée des postes[7] réglementés



Pour 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 $kWh_{ep}/m^2.an$**, et peut descendre à 10 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour les bâtiments les plus performants.

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

Pour un bâtiment de bureau en Lorraine :

> *« Une consommation de pompe à chaleur à 30 kWh$_{ep}$/m².an aurait même pu être divisée par cinq, soit ramenée à 6 kWh$_{ep}$/m².an, si la valeur prescrite pour le coefficient de performance avait été respectée à la fourniture (déduction par le calcul) ! »*

La consommation de chauffage mesurée en **habitat collectif** se situe **autour de 45 kWh$_{ep}$/m².an**. Celle de l'**habitat individuel approche souvent 20 kWh$_{ep}$/m².an**, mais peut être aussi plus élevée.

Le chauffage reste, dans plus de ¾ des cas, 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 (environ 1/3), autour de 22 kWh$_{ep}$/m².an**.

Dans les bâtiments de **bureaux**, la **consommation énergétique d'eau chaude sanitaire (ECS) est très faible**, de 1 à 4 kWh$_{ep}$/m².an au maximum. Ce poste n'est d'ailleurs pas pris en compte par la réglementation thermique 2005 (cf. 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, alors que ce poste n'est pas du tout négligeable pour eux, comme le montrent les graphiques 15 et 16 pour les crèches (opérations n° 13 et 14), les écoles (opérations n° 12 et 16) et la salle multifonctions (opération n° 15).

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

Pour le bâtiment de bureau n° 7, 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 de par le fait que 50 % 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 courant. En effet, pour la plupart de ces opérations, 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 varie généralement dans un rapport de 1 à 12, de 2 à 25 kWh$_{ep}$/m².an en tertiaire de bureaux, et de 1 à 12 kWh$_{ep}$/m².an 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 courant, même si le chauffage reste le premier poste consommateur parmi les postes réglementés.

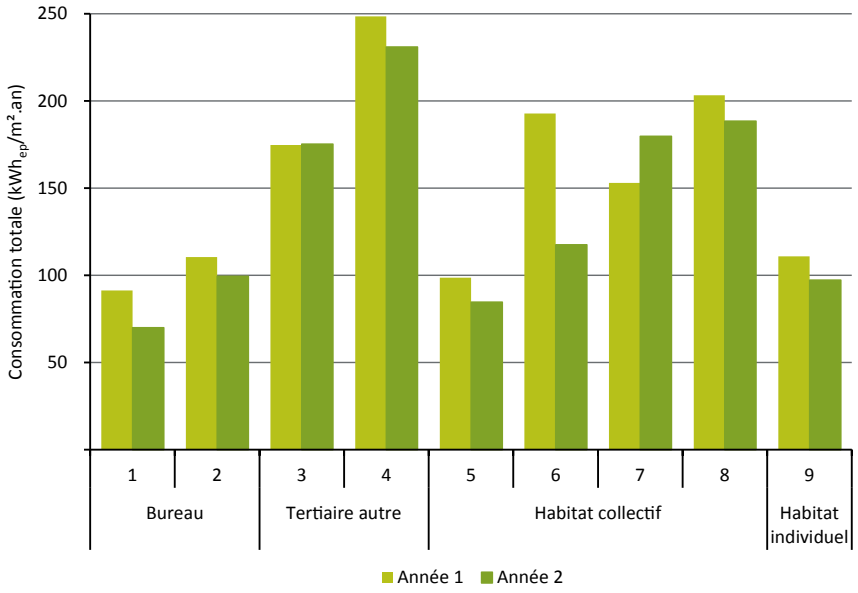
Les nouveaux enjeux concernent :

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

1.2 Évolution des consommations les premières années de suivi

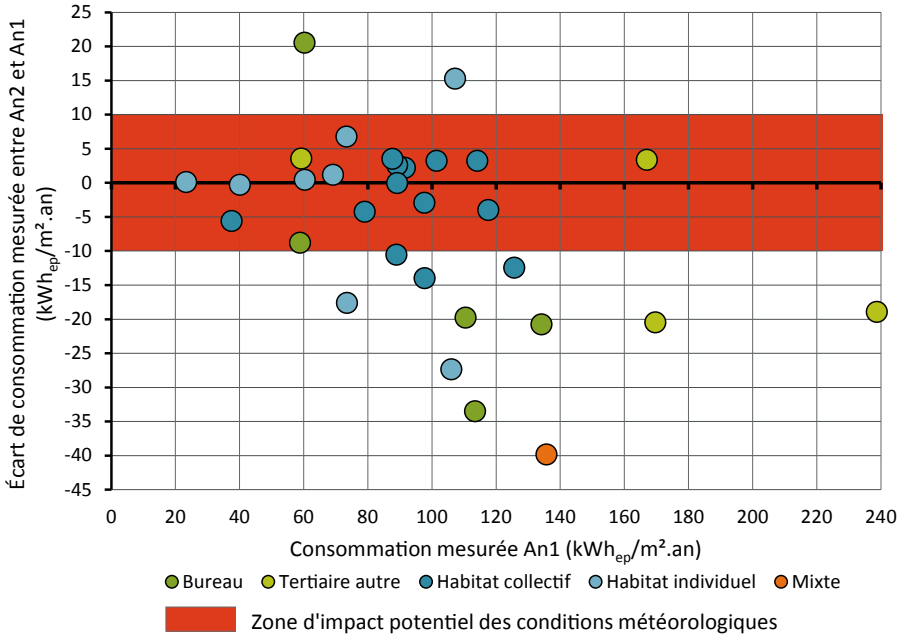
Sur notre échantillon de neuf opérations pour lesquelles on dispose de la consommation totale, celle-ci **diminue** quasiment toujours de la première à la deuxième année de suivi.

Illustration 17 – Consommation totale mesurée des première et deuxième années de suivi



Cette baisse reste prononcée pour la part des postes réglementés, comme le montre le graphique suivant.

Illustration 18 – Variation de la consommation des postes réglementés entre les deux années de suivi



Elle se confirme même au-delà de l'influence des conditions météorologiques. En effet, en considérant que l'impact maximal de ces dernières est de ± 10 $kWh_{ep}/m^2.an$ sur l'échantillon (comme nous le déduisons au § 2.3[8]), nous constatons, pour une grande majorité des opérations et en particulier pour les bâtiments tertiaires, que la consommation des postes réglementés baisse entre la première et la deuxième année de suivi, au-delà de cet effet potentiel des variations météorologiques.

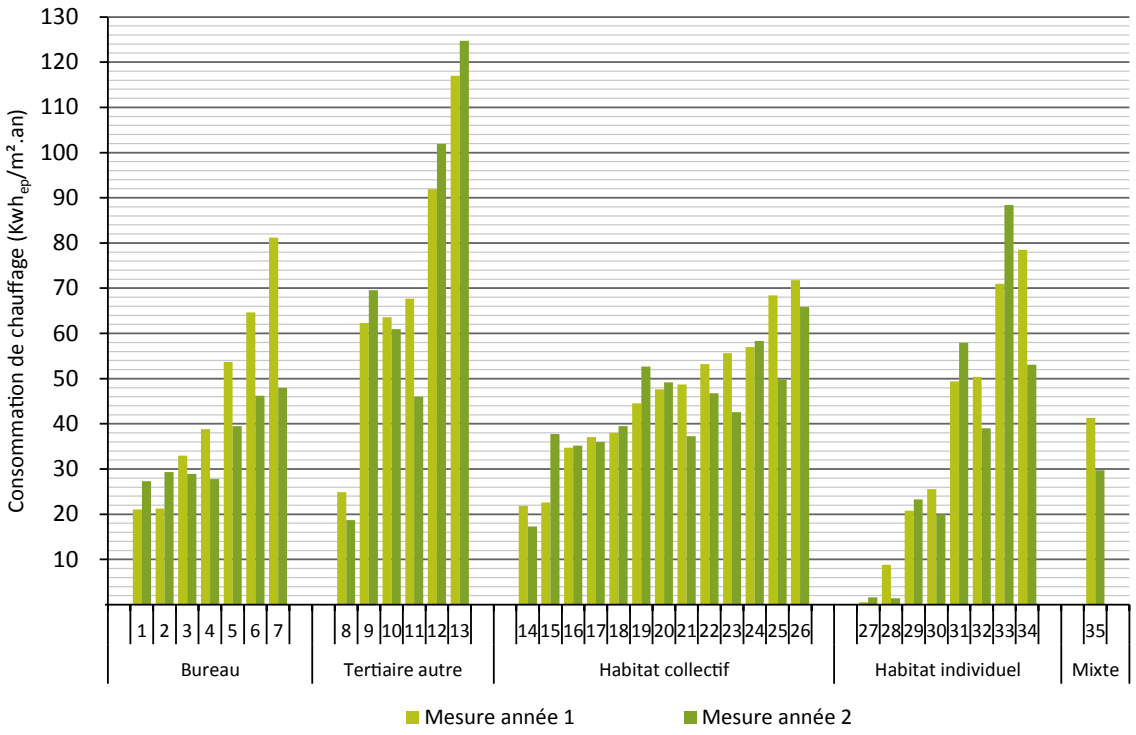
Cette tendance à la baisse des consommations peut s'expliquer par l'amélioration des réglages des équipements techniques, le séchage du bâtiment, voire les recommandations données en fin de première année de mesures, qui peuvent avoir été suivies par les exploitants des bâtiments évalués. Il n'est pas 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 bâtiment 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 (cf. § 1.1.2), nous retrouvons la même proportion d'opérations à la baisse.

Illustration 19 – 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, souvent supérieure à 10 $kWh_{ep}/m^2.an$, que ce soit sur la consommation totale ou la part réglementée, et quelles que soient les conditions météorologiques.

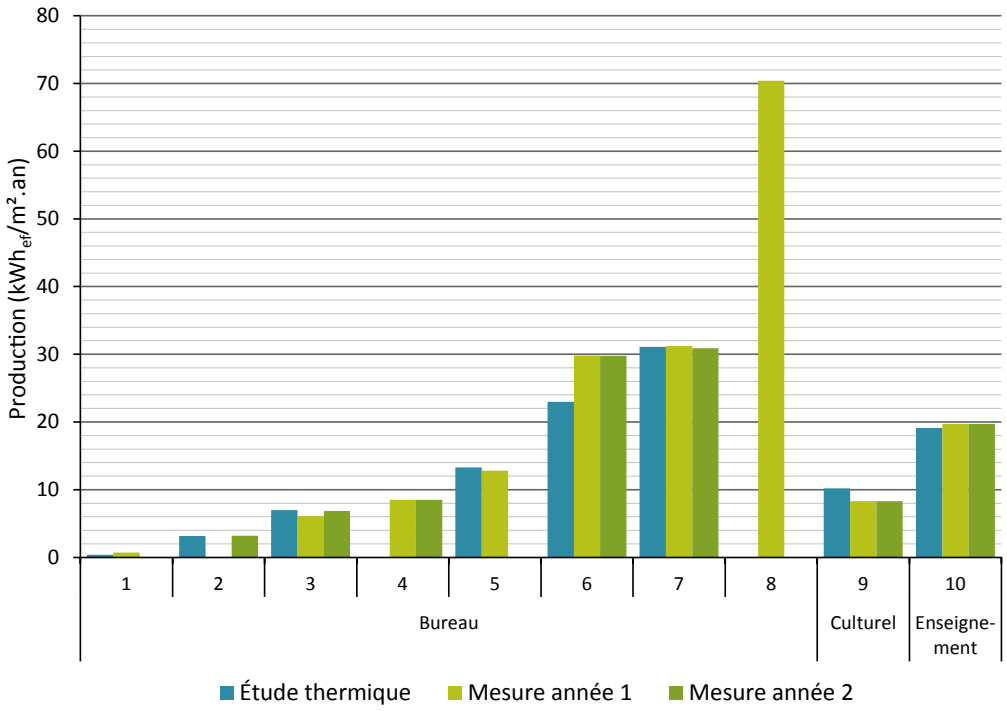
8. En remplaçant le fichier météo de référence de la méthode de calcul Th-CE 2005 par les conditions météorologiques mesurées.

1.3 Production d'électricité photovoltaïque

Une opération sur trois est dotée de capteurs photovoltaïques.

Toutefois, dix opérations seulement, en bâtiments tertiaires, ont leur mesure de production électrique disponible.

Illustration 20 – Production mesurée d'électricité photovoltaïque et valeur de l'étude thermique (en énergie finale)



Les productions sont très variables, avec des petites et des grosses installations.

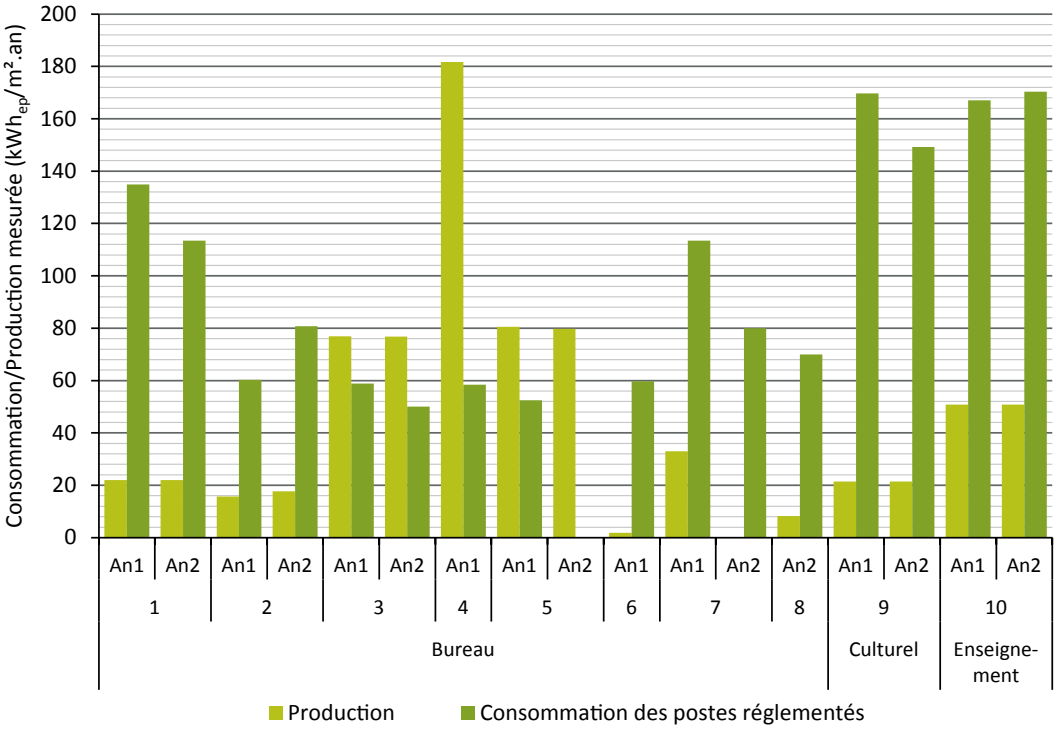
Les deux plus petites (opérations n° 1 et 2) sont limitées à des auvents de protection solaire des fenêtres en façade sud, de 20 et 45 m², avec des surfaces SHON du bâtiment élevées, respectivement de 3 500 et 2 000 m², expliquant les très faibles ratios de production de 1 et 3 kWh_{ef}/m^2.an.

Concernant les plus grosses installations, la production peut monter à un niveau élevé de 70 kWh_{ef}/m^2.an en énergie finale.

Les productions mesurées sont stables entre la première et la deuxième année, et généralement au même niveau que leur valeur de l'étude thermique réglementaire, montrant ainsi le peu d'influence des conditions météorologiques.

En **comparaison, en énergie primaire, à la consommation des postes réglementés** du bâtiment, les productions d'électricité photovoltaïque peuvent être supérieures.

Illustration 21 – Comparaison des mesures de production d'électricité photovoltaïque et de consommation des postes réglementés



La production de l'**opération n° 4**, de 180 $kWh_{ep}/m^2.an$, est même supérieure à la consommation totale du bâtiment de bureau, ce qui en fait un bâtiment dont le **bilan énergétique global est positif**, même si la production et la consommation ne coïncident pas toujours dans le temps.

À retenir

Les installations photovoltaïques des bâtiments tertiaires de l'échantillon produisent généralement de 20 à 80 $kWh_{ep}/m^2.an$ (8 à 30 en énergie électrique finale).

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

© Cerema

2

Conditions météorologiques

L'essentiel

Les conditions météorologiques sont 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 de consommation 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.

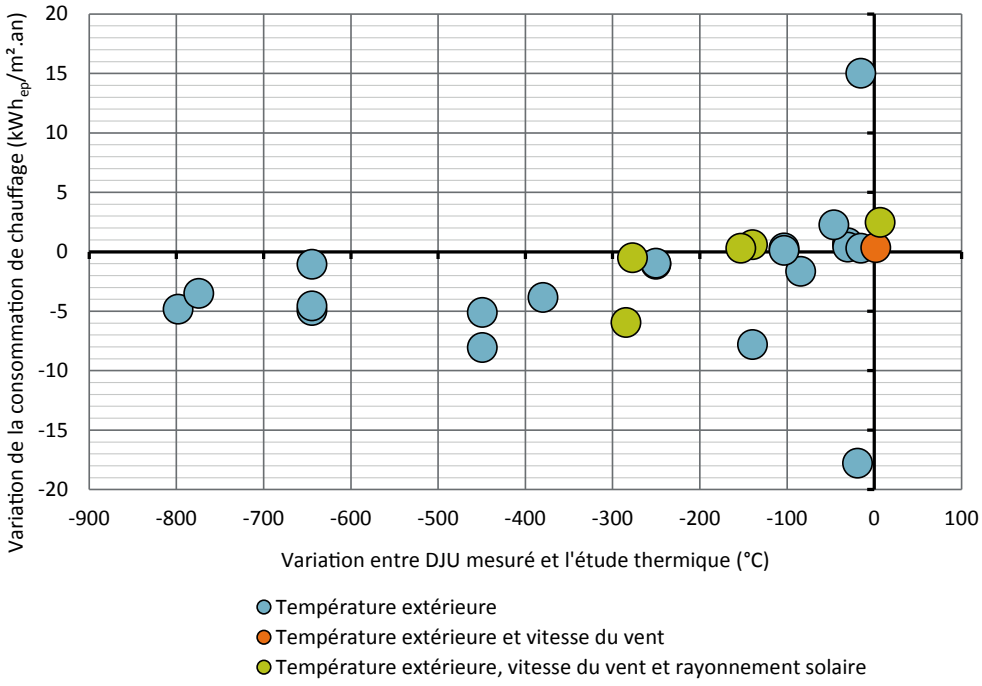
Auparavant, pour connaître l'impact des conditions météorologiques réelles sur la consommation de chauffage, il suffisait d'appliquer une relation de proportionnalité avec la température extérieure hivernale, mesurée par rapport à une température de non-chauffage de 18 °C. Mais avec les bâtiments à basse consommation, nous constatons 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 apports de chaleur étant maintenant davantage confinés.

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.

2.1 Influence des paramètres météorologiques

Le niveau des Degrés jours unifiés (DJU)[9] 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. Le confinement des apports internes et solaires dans des enveloppes très isolées conduit à abaisser significativement ce seuil sur certaines opérations de 18 °C à 14 °C. Le graphique ci-dessous illustre la non linéarité entre la variation des DJU (base 18) et les variations de consommations attribuables à la météo.

Illustration 22 - Évolution de la consommation de chauffage après recalculs avec les différents paramètres météorologiques mesurés, au regard de la variation de DJU



Pour les bâtiments à basse consommation, la **météo influence la consommation de chauffage par ses différents paramètres**, et non pas essentiellement par celui de la température. Ainsi, un rayonnement solaire plus élevé peut compenser des températures plus basses, voire être prépondérant dans le bilan thermique (apports solaires par rapport aux déperditions).

À retenir

Pour les bâtiments à basse consommation, le niveau des Degrés jours unifiés (base 18) n'est plus un indicateur suffisant pour caractériser, à lui seul, l'impact du climat sur la consommation de chauffage. La température de non-chauffage semble devoir être abaissée à 14 °C, voire moins selon la fonction du bâtiment.

9. Les Degrés jours unifiés (DJU), également qualifiés de « Base 18 », sont l'addition des écarts de température journaliers d'un lieu par rapport à 18 °C, sur une période de chauffage de 232 jours (du 1er octobre au 20 mai).

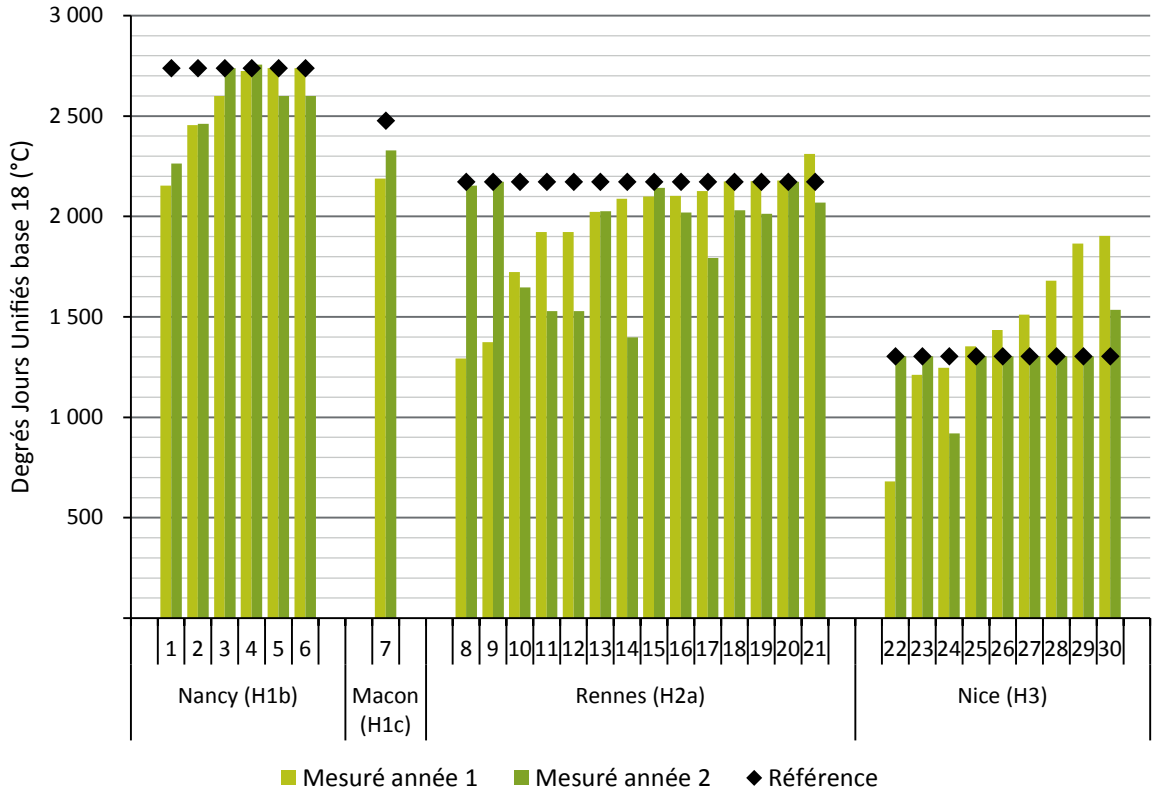
2.2 Niveaux de température extérieure hivernale

La météo des années de suivi de l'échantillon a été la plupart du temps plus clémente que la météo de référence de la réglementation thermique 2005 en termes de température hivernale.

Nous observons des différences plus ou moins marquées selon la zone climatique dans laquelle se situent les opérations. Ainsi, pour les opérations situées dans la zone H2, nous relevons des variations relativement faibles et homogènes par rapport au climat de référence trentenaire. Les écarts sont plus marqués pour la zone H1. Quant à la zone H3 (climat méditerranéen), nous observons 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.

Néanmoins les écarts avec la météo de référence sont assez faibles en comparaison des écarts de DJU entre les différentes zones climatiques.

Illustration 23 - DJU mesurés et DJU trentenaires des stations de référence



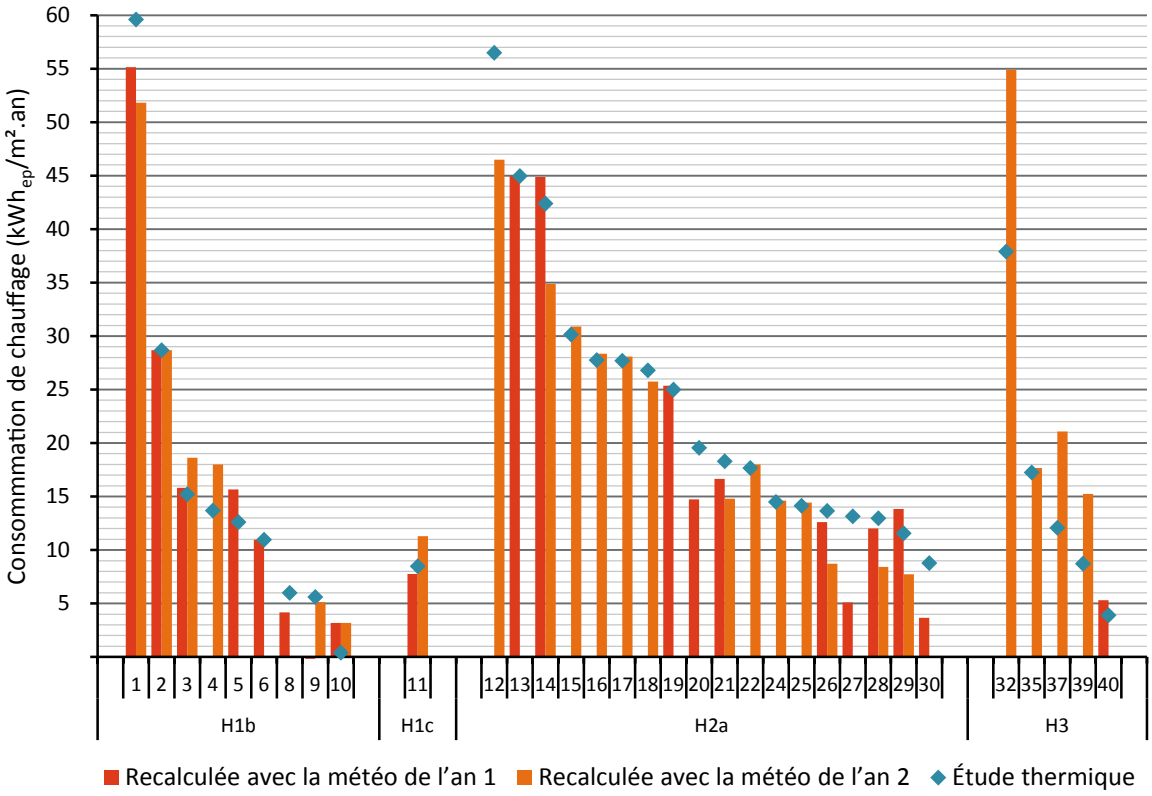
2.3 Impact sur la consommation de chauffage

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 (cf. Annexe A.1).

Il est à noter que sur notre échantillon, selon les opérations, les zones climatiques peuvent être différentes, et que trois saisons de chauffe différentes sont concernées, de mi-2010 à mi-2014.

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). La zone H2 est surreprésentée dans l'échantillon. Certaines zones ne comportent qu'un ou deux bâtiments dans l'échantillon actuel.

Illustration 24 – Consommation de chauffage recalculée avec la météo réelle



Nous observons pour les bâtiments étudiés que la météo réelle fait généralement varier la consommation de chauffage de l'étude thermique réglementaire jusqu'à +/-10 kWh/m².an.

L'amplitude de ces simulations semble se retrouver dans la réalité.

Pour la rénovation d'un immeuble de petits logements en Rhône-Alpes :

> *« Une variation de météo suite à un hiver clément a conduit à une division par deux des consommations de chauffage sans que d'autres paramètres semblent avoir influé. »*

Compte tenu de la diminution de la période de chauffage dans les bâtiments performants, on assiste à un très fort effet de levier de la météo. Les variations relatives du nombre de jours de chauffage peuvent ainsi être importantes d'une année où l'hiver est rude à une année où l'hiver est doux. Cet effet est d'autant plus important dans les bâtiments ou l'enveloppe est compacte par rapport à la surface utile 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, généralement jusqu'à +/-10 $kWh_{ep}/m^2.an$, d'une année à l'autre ou par rapport au climat de référence de la zone climatique concernée.

© Arnaud Bouissou/MEDDE-MLETR

3

Conditions d'occupation

L'essentiel

Les conditions d'occupation sont un facteur important de la consommation de chauffage. L'évaluation de la température de consigne pour l'installation de chauffage et celle 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, comme pour expliquer l'écart de consommation avec la valeur calculée dans l'étude thermique réglementaire.

L'analyse montre que les températures de consigne pratiquées présentent des variabilités importantes dans l'habitat, alors qu'elles sont plus homogènes dans les bureaux et 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. La consommation de chauffage demeure très sensible à la température de consigne, et la règle générale d'une hausse de 7 % sur la consommation de chauffage pour 1 °C de plus n'est plus utilisable. Il vaut mieux raisonner en valeur absolue.

Les apports thermiques des occupants et des appareils sont deux fois plus élevés dans les bureaux que dans l'habitat. Dans les bâtiments à basse consommation, les apports internes représentent 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, en particulier dans l'habitat.

3.1 Température de chauffage

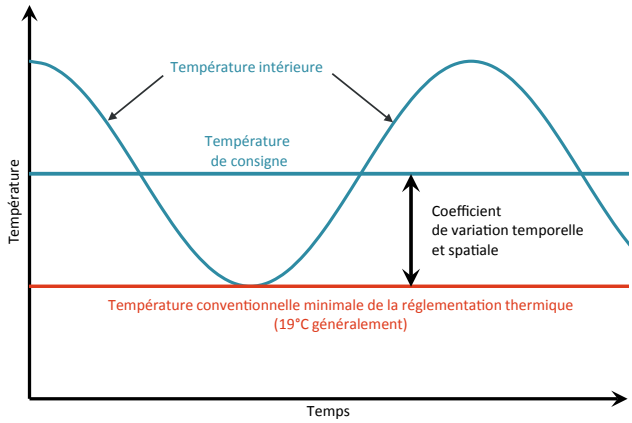
3.1.1 Les températures de consigne constatées

La **température de consigne** de chauffage est la température que l'on souhaite maintenir stable et homogène pour l'air ambiant d'un local.

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 selon la précision des régulations et l'inertie des émetteurs, appelé variation temporelle, entre la température conventionnelle minimale de la réglementation thermique et la température de consigne de chauffage du local.

À cet écart s'ajoute 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 hauteur[10]).

Illustration 25 – La température de consigne



La température conventionnelle minimale de la réglementation thermique est de 19 °C en général (21 °C pour les établissements sanitaires[11], 15 °C pour les bâtiments sportifs, de stockage, industriels et de transport).

Pour les opérations du panel, à cette valeur conventionnelle prise comme température minimale de fonctionnement des émetteurs, s'ajoute une variable temporelle et spatiale comprise entre **+0,14 et +2 °C** pour obtenir la **température de consigne de l'étude thermique réglementaire** servant au calcul de consommation.

Aucune opération ne comportant de grandes hauteurs sous plafond, celle-ci peut être considérée comme étant aussi la **température de consigne de la zone d'occupation du local** pour l'installation de chauffage.

Elle 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, selon la méthode exposée en annexe A.2.3.

Si l'on prend en compte les caractéristiques de la régulation, l'histogramme de l'illustration 26 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 le type d'usage** :

- entre 0 et +5 °C pour l'habitat collectif ;
- entre -2 °C et +3 °C pour les maisons individuelles, avec 5 valeurs sur 8 comprises entre 0 et +1 °C ;
- entre 0 et +3 °C pour le bâtiment mixte, en fonction de ses différents usages ;
- entre 0 et +3 °C pour les bureaux ;
- entre -1 °C et +1 °C pour les autres bâtiments tertiaires (enseignement et santé).

10. Dans la méthode Th-CE 2005.
11. Dans notre échantillon : un établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes.

La variabilité de la température de consigne est plus élevée dans l'habitation, notamment dans les logements collectifs. Cela n'est pas nécessairement dû au fait que l'occupant est moins vertueux, mais que celui-ci ne peut pas toujours agir sur le réglage de cette température, lorsque l'installation de chauffage est collective.

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 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 toujours supérieure de 0 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 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 19 °C et 25 °C.

3.1.2 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 28 opérations, l'opération mixte avec différentes destinations d'usage exclue.

Fort logiquement, la consommation de chauffage évolue dans le même sens que celle de la température de consigne, donc à la hausse (cf. Illustration 27), pour la majorité des opérations et à la baisse pour les deux opérations pour lesquelles la température de consigne pratiquée est plus faible. Cependant, ces évolutions varient différemment selon la destination d'usage et le climat :

- pour les maisons individuelles, les écarts à la hausse s'étalent de 1 à 18 kWh_{ep}/m^2.an. La consommation de chauffage semble évoluer d'une manière quasi-linéaire avec une augmentation rapide de 4 à 5 kWh_{ep}/m^2.an dès que la température augmente de 1 °C. Par contre, la diminution semble être dissymétrique avec une évolution presque deux fois plus faible pour la seule opération présentant une baisse de la température de consigne. Cette dernière est en effet située en zone méditerranéenne. Cet effet s'explique par la douceur des conditions météorologiques qui fait que le besoin de chauffage disparaît plus rapidement en climat doux qu'en climat froid lorsque la température intérieure descend ;

Illustration 26 – Les températures de consigne cibles et pratiquées

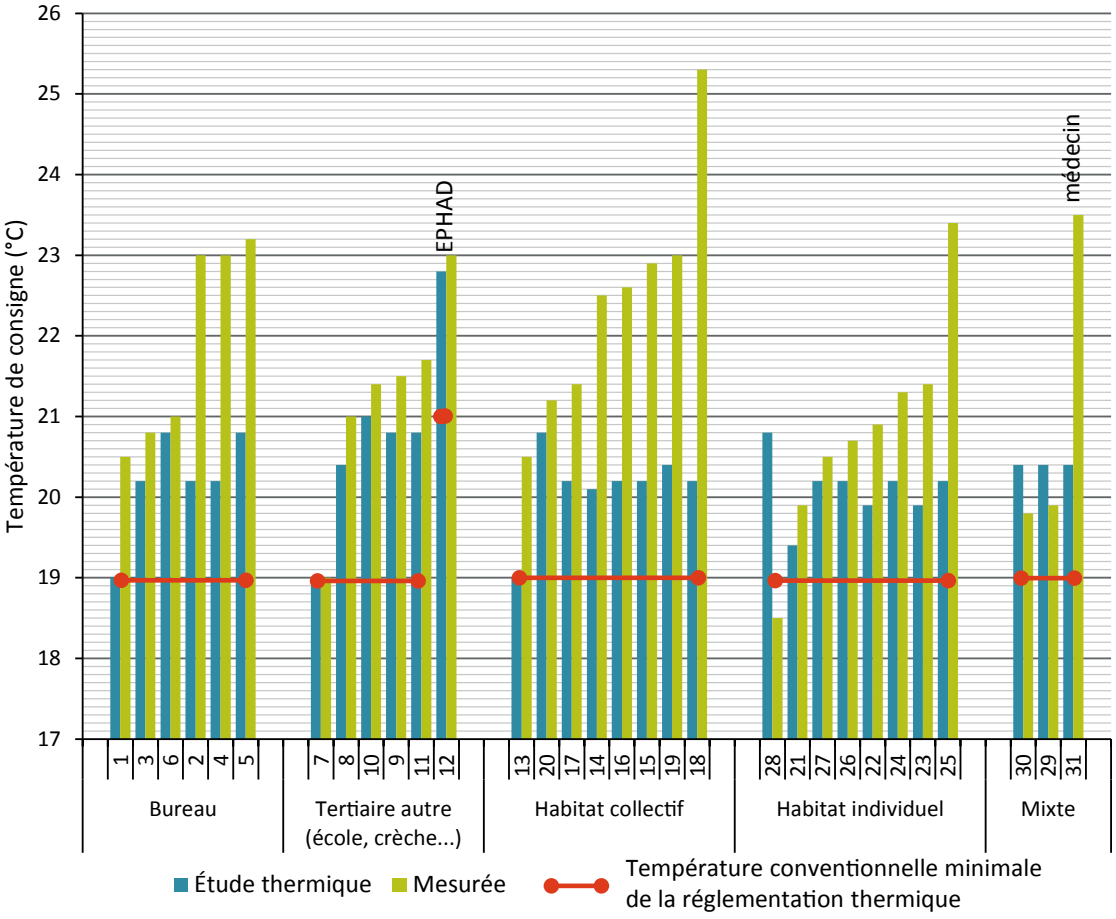
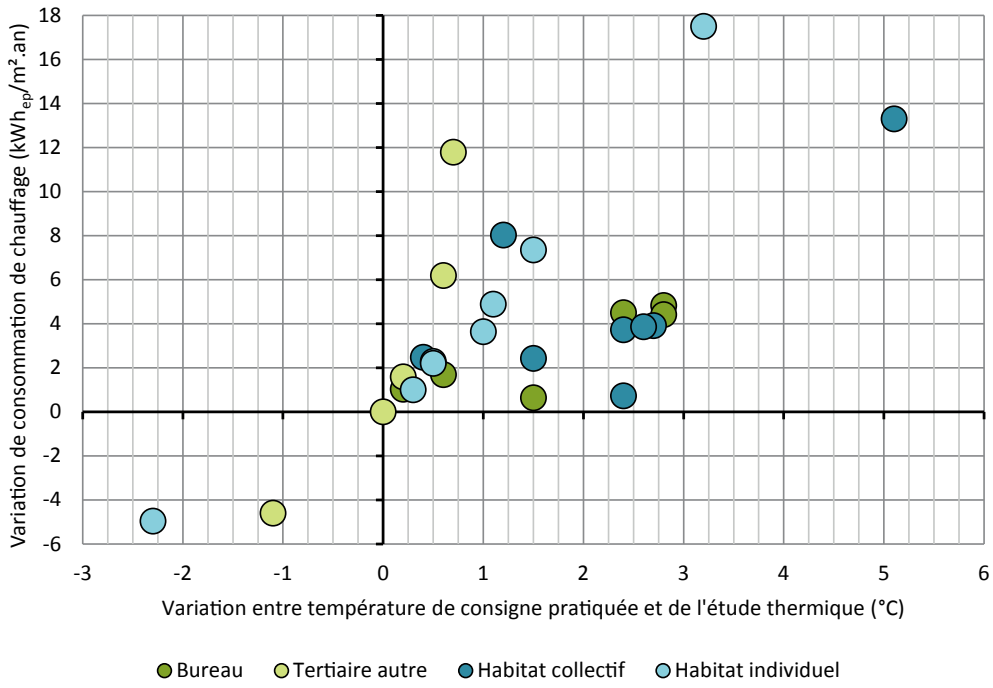


Illustration 27 – Évolution de la consommation de chauffage après recalcul avec la température de consigne pratiquée



- pour les logements collectifs, les écarts à la hausse s'étalent de 0,7 à 14 $kW_{ep}/m^2.an$. Les écarts de la consommation de chauffage sont dispersés et évoluent d'une façon moins linéaire que pour les maisons individuelles et selon une pente deux fois plus faible ; la consommation de chauffage augmente de 2 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour une augmentation de 1 °C de la température de consigne. Ces opérations sont globalement situées dans les zones climatiques H1 et H2 (quatre opérations respectivement par zone). La baisse des écarts ne peut pas être uniquement expliquée par le facteur climatique ;
- pour les bureaux, les écarts à la hausse s'étalent de 0,6 à 5 $kW_{ep}/m^2.an$. À l'instar des logements collectifs, l'évolution de la consommation de chauffage est plus faible, une augmentation de moins de 2 $kW_{ep}/m^2.an$ pour une augmentation de 1 °C de la température de consigne ;
- pour les autres bâtiments tertiaires (quatre opérations d'enseignement et une opération de santé), les écarts à la hausse s'étalent de 1 à 12 $kW_{ep}/m^2.an$. L'évolution de la consommation de chauffage est la plus importante (notamment pour l'enseignement), avec une augmentation de l'ordre de 8 $kW_{ep}/m^2.an$ pour une hausse de 1 °C de la température de consigne. À l'instar des maisons individuelles, la diminution semble être dissymétrique avec une évolution presque deux fois plus faible pour la seule opération présentant une baisse de la température de consigne. Cette dernière est également située en zone méditerranéenne.

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.

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 % sur la consommation de chauffage. En habitat individuel, une augmentation de 0,3 à 3 °C sur la température de consigne entraîne une augmentation de 8 à 60 % sur la consommation de chauffage.

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 ;
- la consommation de chauffage demeure très sensible à la température de consigne, avec de l'ordre de 0,5 à 8 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour 1 °C d'écart, et des résultats à la hausse généralement de 1 à 8 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour l'habitat et de 1 à 5 $kWh_{ep}/m^2.an$ pour les bureaux, mais pouvant monter jusqu'à +18 $kWh_{ep}/m^2.an$ dans certains cas.

3.2 Apports internes

Dans la méthode Th-CE 2005, 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, associé à des horaires d'occupation. 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.

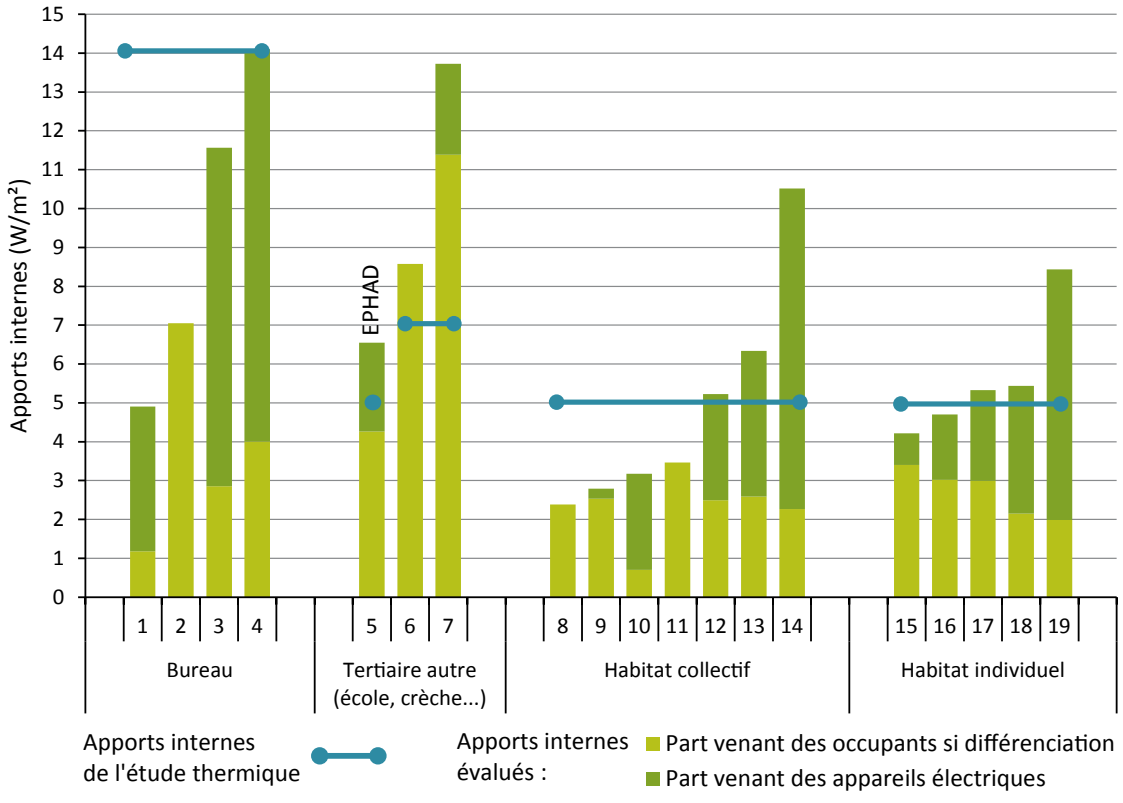
Nous nous intéressons ici aux apports internes hors installation d'éclairage et à leur impact sur la consommation de chauffage.

3.2.1 Des apports internes hors éclairage très variables

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).

Dans l'illustration 28 nous présentons les apports internes évalués (cf. Annexe A.2.2) en comparaison de leur valeur conventionnelle par destination d'usage dans l'étude thermique réglementaire (méthode Th-CE 2005).

Illustration 28 – Apports internes hors éclairage en période d'occupation et leur valeur dans l'étude thermique réglementaire



La figure présente les apports internes évalués par opération ramenés au nombre d'heures d'occupation conventionnel de la méthode Th-CE 2005 par destination d'usage (soit par exemple une durée hebdomadaire de 128 heures pendant 52 semaines pour l'habitat ; cf. § 3.2.2). Les parts liées aux occupants et aux appareils électriques sont distinguées quand elles sont calculées.

Pour les maisons individuelles (cinq opérations) et les logements collectifs (sept opérations), le ratio est proche de la valeur conventionnelle de 5 W/m² (moyenne de 5,6 W/m² pour les maisons individuelles et 4,8 W/m² pour le collectif). La variabilité des apports internes est plus importante dans les logements collectifs que dans les maisons individuelles. La part liée aux appareils électriques augmente d'une façon importante, probablement selon le taux d'équipement en appareils électriques et leurs fréquences d'utilisation.

Pour les bureaux (quatre opérations), les ratios affichent une moyenne de 9,4 W/m² presque 1,5 fois plus faible que la valeur conventionnelle de 14 W/m². Contrairement à l'habitation, la part des appareils électriques est prépondérante dans les bâtiments de bureaux à cause du taux élevé d'équipements en appareils électroniques.

Pour les bâtiments d'enseignement, la valeur est haute pour une des deux opérations. Cela s'explique par l'écart entre le nombre de semaines occupées en pratique, par rapport à la convention, pour le bâtiment concerné. L'autre valeur est proche de la valeur du calcul réglementaire de 7 W/m². Comme attendu, la part des occupants est prépondérante à cause de la forte densité d'occupation.

En ce qui concerne les autres bâtiments tertiaires, la valeur évaluée pour le bâtiment de santé est proche de la valeur conventionnelle de 5 W/m².

À retenir

Les apports internes hors éclairage, en période d'occupation, sont très variables.
Pour les bâtiments d'habitation, ils varient autour de 5 W/m² (surface habitable).
Pour les bâtiments de bureaux, ils varient autour de 9 W/m² (surface utile).

3.2.2 Des périodes d'occupation importantes

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 interview des occupants des bâtiments via un questionnaire adapté. Ainsi ils reposent sur leur témoignage. Toute heure ou toute semaine où les usagers disent qu'au moins l'un d'entre eux était dans les locaux est considérée comme en occupation. C'est donc à la personne interrogée de juger si la présence, au cours de l'heure, de la journée et de la semaine lui paraît suffisante pour considérer les lieux comme occupés, notamment lors des moments de présence discontinue et de passage. 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 résultats ont pu être obtenus pour 21 opérations.

Les graphiques suivants présentent le nombre d'heures d'occupation par semaine le nombre de semaines d'occupation par an en comparaison avec les valeurs conventionnelles de la méthode Th-CE 2005, différentes suivant les destinations d'usages.

Illustration 29 – Profils d'occupation hebdomadaire

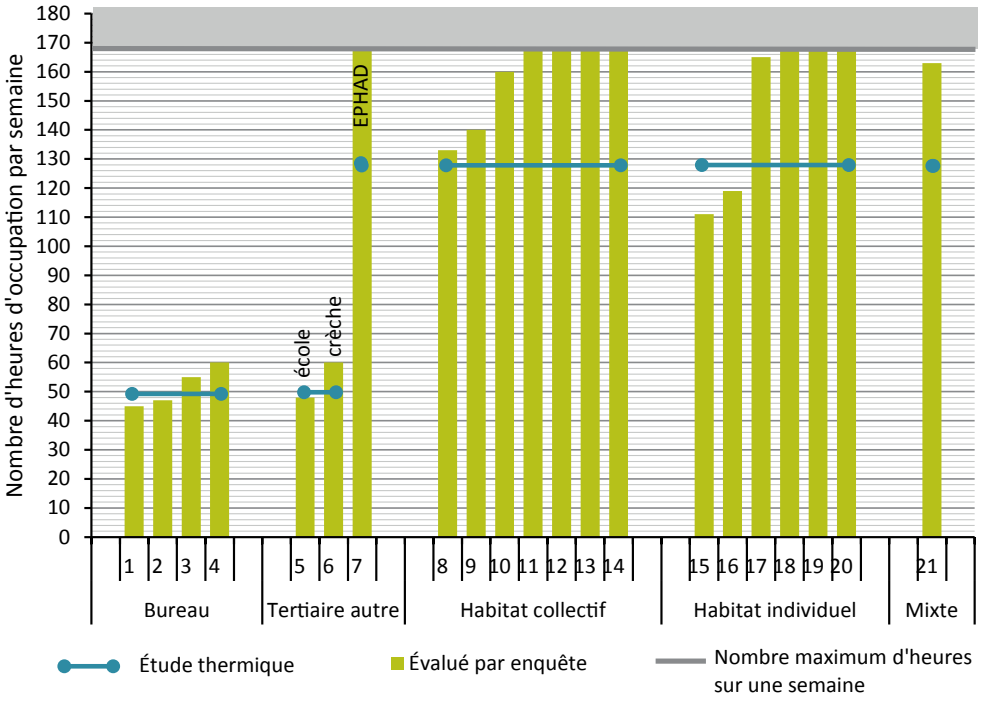
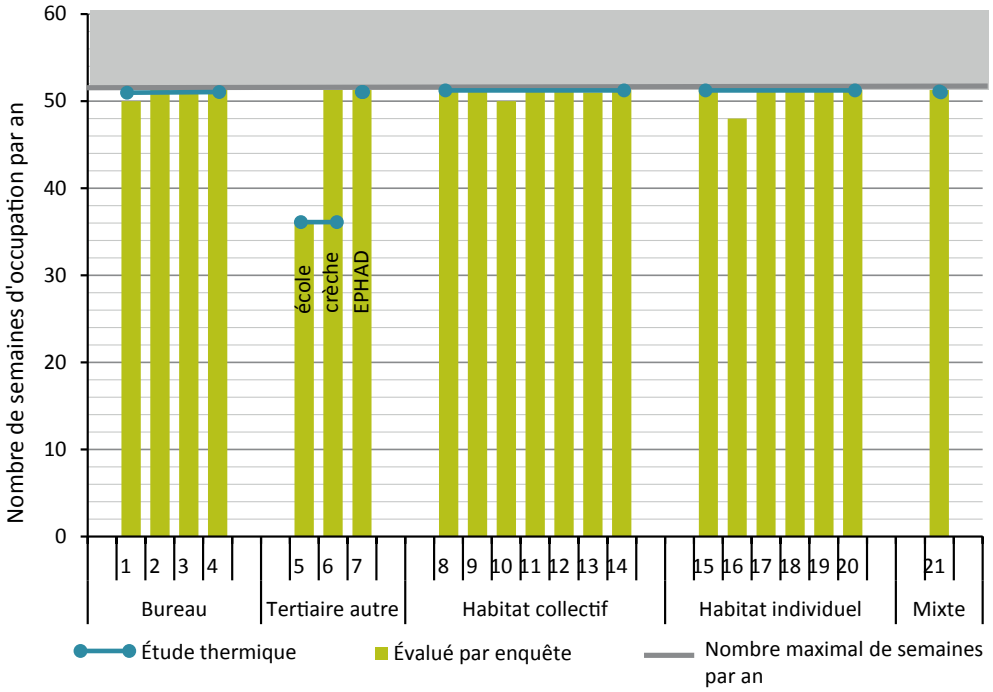


Illustration 30 – Profils d'occupation annuelle



Pour le logement, les valeurs d'occupation conventionnelles sont de 128 heures par semaine (inoccupation uniquement du lundi au vendredi pendant 8 heures par jour) sur 52 semaines par an.

Les témoignages des occupants sont très proches de ces valeurs : seulement trois opérations sur les 14 ont moins de semaines occupées, la différence s'étendant de -1 à -4 semaines. Le chiffre -4 paraît cohérent avec des périodes de vacances.

Le scénario réglementaire paraît donc réaliste sur ce point, par rapport à l'occupation observée.

Concernant l'occupation hebdomadaire, 2 des 15 opérations affichent des valeurs inférieures à la valeur conventionnelle. En majorité, l'occupation déclarée est donc supérieure à la valeur réglementaire : une moyenne de 155 heures au lieu des 128 heures du calcul réglementaire avec plusieurs opérations qui affichent une occupation 24h/24, soit +20 % en moyenne. Ce chiffre doit être relativisé compte tenu de la taille et de la composition de l'échantillon. Ces données ont été obtenues en majorité suite à des questionnements d'occupants disponibles et sur place, donc, effectivement, présents chez eux souvent ou au moins aux heures d'intervention des personnes réalisant le suivi des bâtiments.

Pour les bâtiments de bureaux (quatre opérations), l'occupation apparaît continue sur l'année (sauf pour l'un d'entre eux), ce qui correspond à une situation de roulement pour les vacances destinée à éviter une fermeture du site et permettre une continuité de service. Le scénario de la méthode Th-CE 2005 pour ces destinations d'usage est en accord et inclut également ces 52 semaines d'occupation. Le nombre d'heures de présence hebdomadaire est globalement proche de la convention de calcul : moyenne de 52,5 heures contre 50 heures dans la réglementation thermique.

En ce qui concerne les bâtiments d'enseignement (deux opérations), les données recueillies sont en cohérence avec le scénario de la méthode Th-CE 2005 pour l'école, mais sont éloignées pour la crèche ouverte en continu pendant l'année, avec des plages horaires importantes : occupation hebdomadaire de 60 heures pour les 52 semaines de l'année contre 50 heures sur 36 semaines dans le calcul réglementaire qui tient compte des vacances et de journées moins chargées.

À retenir

Pour les bâtiments de bureau l'occupation est généralement continue sur l'année, à raison de 45 à 60 heures par semaine.

Pour les bâtiments d'habitation, l'occupation est généralement continue sur l'année, à deux ou quatre semaines près de congés. La présence hebdomadaire varie de 110 à 168 heures (soit de 2/3 à 100 % du temps).

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

Nous nous intéressons ici à l'impact des apports internes hors éclairage sur la consommation de chauffage.

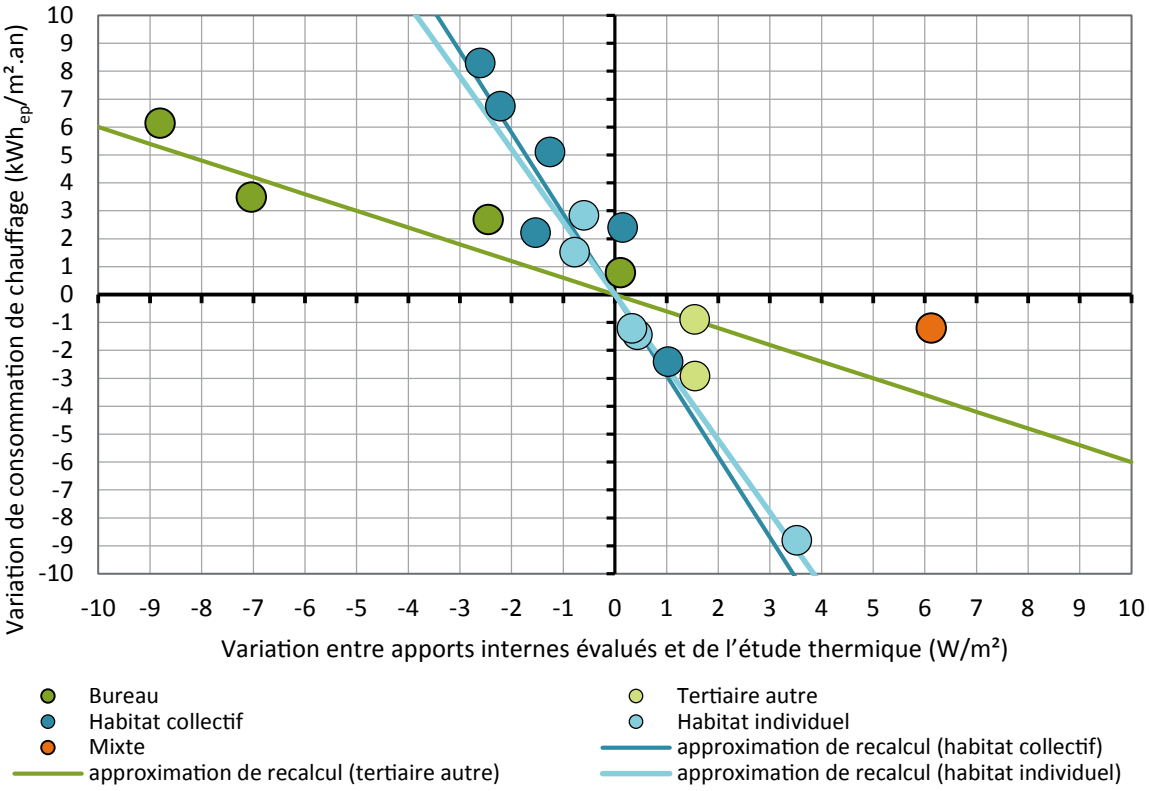
Les consommations de l'étude réglementaire ont pu être recalculées pour 22 opérations avec les apports internes constatés.

Le graphique suivant présente la variation des consommations de chauffage engendrée par l'introduction, dans l'étude thermique réglementaire, des apports internes évalués (en remplacement de la valeur conventionnelle). Logiquement, lorsque les apports internes constatés sont supérieurs aux apports internes de l'étude thermique, la consommation de chauffage baisse, et inversement. Nous constatons même que ces **évolutions sont relativement proportionnelles** :

- pour les maisons individuelles (cinq opérations), la variabilité des écarts d'apports internes est faible (entre -1 et 4 W/m²). Nous observons une variation proportionnelle de la consommation de chauffage par rapport à la variation des apports internes, soit une **diminution de la consommation de chauffage de 2,6 kWh_{ep}/m^2.an pour une augmentation de 1 W/m² des apports internes** ;

- pour les logements collectifs (six opérations), les apports internes observés sont globalement inférieurs aux valeurs de l'étude thermique. Nous observons une tendance similaire aux maisons individuelles. Une diminution de **1 W/m² des apports internes entraîne ainsi une augmentation de la consommation de chauffage de 2,9 kWh_{ep}/m².an**;
- pour les bâtiments de bureaux (quatre opérations), les apports internes observés sont toujours inférieurs aux valeurs de l'étude thermique, avec une variabilité beaucoup plus importante que dans l'habitat (jusqu'à -9 W/m²). Toutefois, en valeur, l'impact sur la consommation de chauffage est plus faible, de l'ordre de -0,6 kWh_{ep}/m².an par unité d'apports internes (du fait d'une durée d'occupation bien moindre).

Illustration 31 – Évolution de la consommation de chauffage après recalcul avec les apports internes hors éclairage évalués



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. D'où une grande sensibilité de la consommation de chauffage à leur variation, sachant qu'en outre, ils sont également assez variables d'un usage à l'autre.

Pour 1 W/m² d'apports internes supplémentaires (à titre de référence, une personne émet environ 100 W), la consommation de chauffage baisse de :

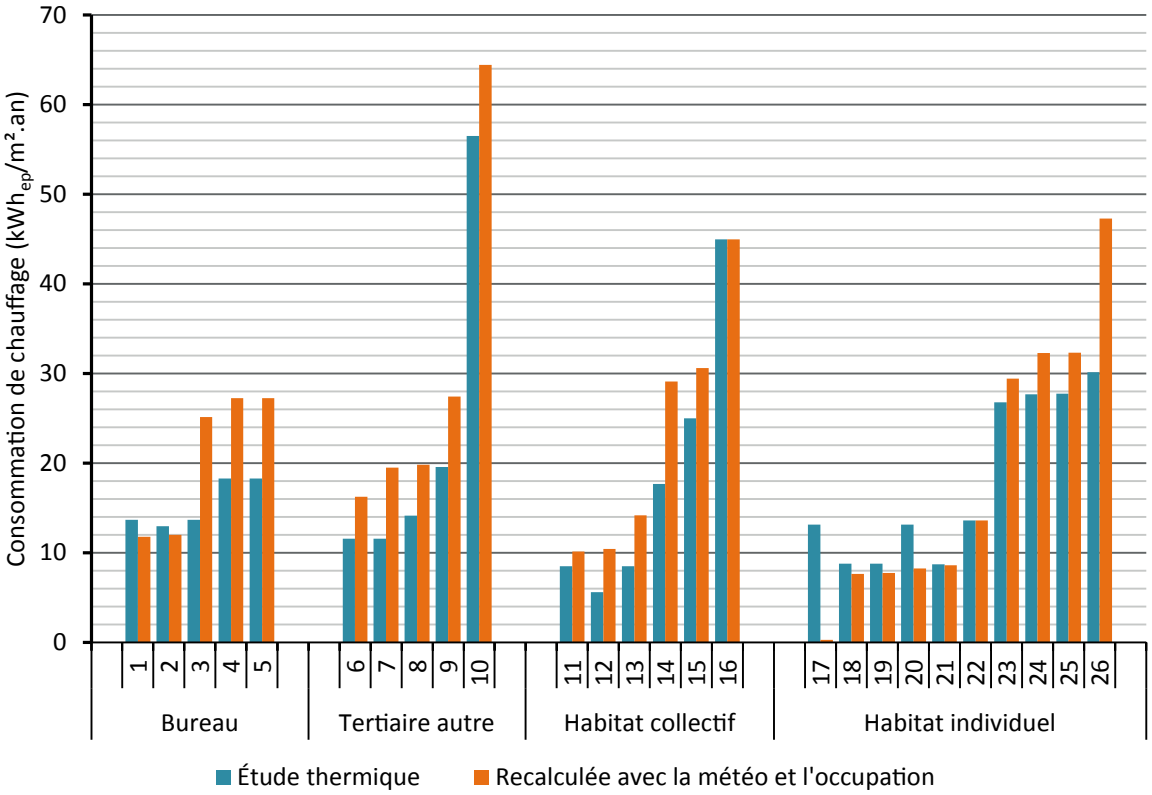
- 3 kWh_{ep}/m².an en habitat collectif ;
- 2,5 kWh_{ep}/m².an en habitat individuel ;
- 0,5 kWh_{ep}/m².an en bureaux.

3.3 Combinaison des conditions météorologiques et d'occupation

Nous nous intéressons ici à l'impact du jeu de paramètres combinés occupation, température de consigne et météo sur la consommation de chauffage.

Le recalcul de la consommation de chauffage de l'étude thermique réglementaire avec la météo mesurée (d'au moins une année de suivi), l'occupation constatée et les températures de consigne pratiquées a pu être effectué sur 26 opérations de l'échantillon.

Illustration 32 – Consommation de chauffage recalculée avec les conditions météorologiques et d'occupation



Au global, l'effet combiné de ces différents paramètres entraîne une augmentation significative de la consommation en chauffage pour la plupart des opérations d'habitat collectif et de bâtiments tertiaires. Pour trois bâtiments de bureau sur cinq, la variation est même de 50 % ou plus.

Les valeurs prises dans le calcul thermique réglementaire apparaissent donc plus favorables que ce qui est constaté pour ces opérations. C'est toutefois moins le cas pour les maisons individuelles.

© Cerema

4

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.

Les enveloppes rencontrées sont d'une grande diversité, que ce soit au niveau de la structure, du type d'isolation ou du matériau isolant.

L'isolation thermique du bâti retenue en phase conception est très performante, avec un coefficient U_{bat} à 0,36 W/m².K. en moyenne.

La méthode d'évaluation du U_{bat} mise en place par le Cerema, qui reste à consolider, laisserait apparaître un écart systématiquement négatif 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.

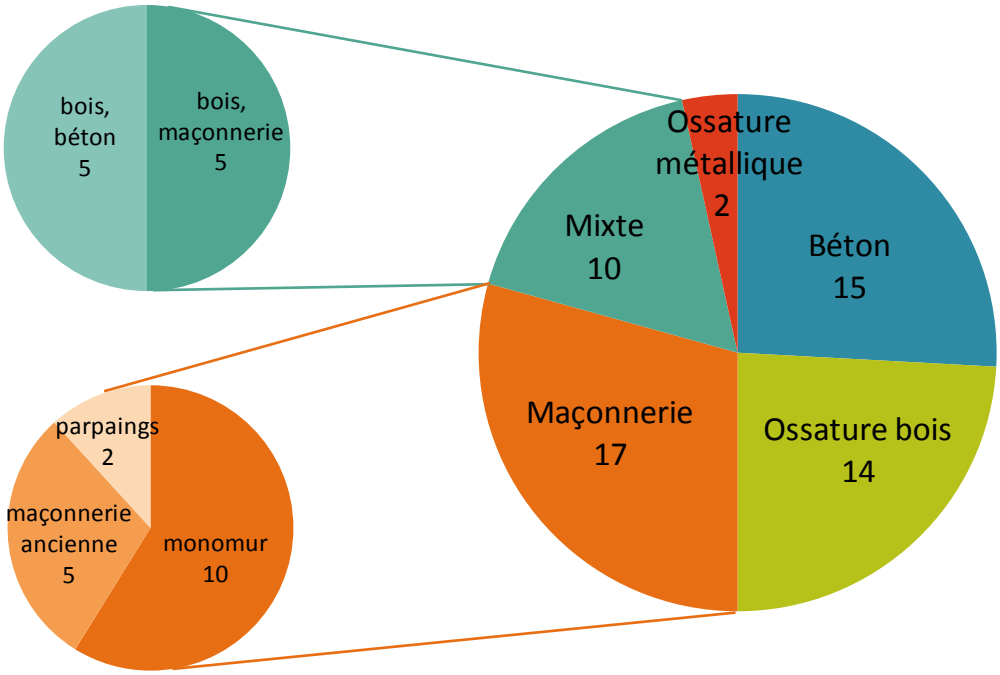
L'étanchéité à l'air des enveloppes est globalement bien réalisée.

4.1 Caractéristiques des enveloppes de l'échantillon

Dans l'échantillon de capitalisation 2015, les modes constructifs sont globalement équirépartis : ¼ de bâtiments construits en béton, ¼ de bâtiments en ossature bois, un peu plus d'¼ de bâtiments en maçonnerie et un peu moins d'¼ de bâtiments construits en ossature métallique ou en construction mixte (c'est-à-dire ossature bois et béton ou ossature bois et maçonnerie).

Parmi les bâtiments construits en maçonnerie, on retrouve majoritairement des briques monomurs (essentiellement utilisées dans des bâtiments de faible hauteur), des constructions en maçonnerie ancienne (pour les bâtiments rénovés) et deux bâtiments construits en parpaing béton.

Illustration 33 – Répartition des modes constructifs (en nombre d'opérations)



4.1.1 L'isolation des parois verticales opaques

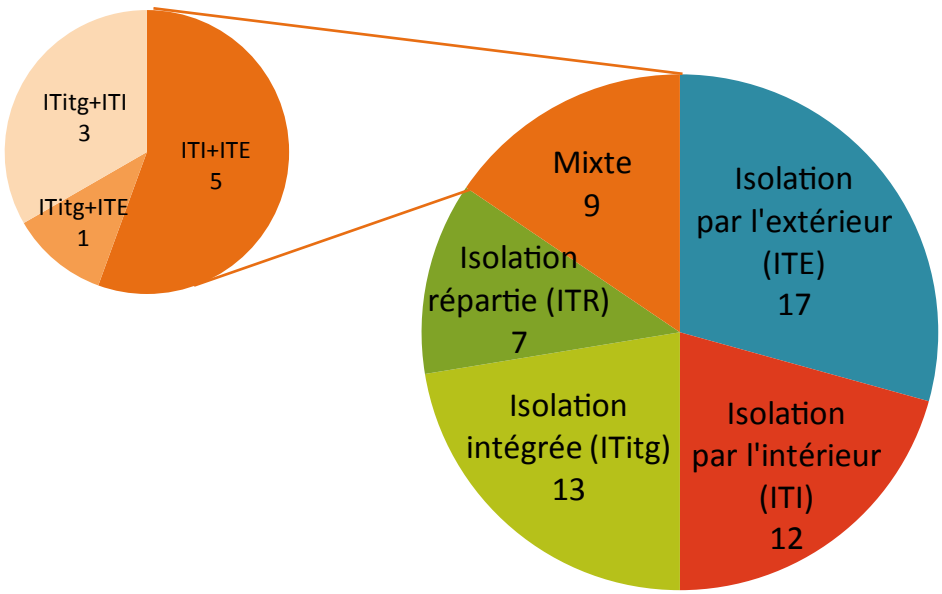
Les bâtiments sont majoritairement isolés par l'extérieur (30 %) ce qui permet, en première approche et au regard d'autres modes d'isolation, de réduire la longueur des ponts thermiques et de contribuer à l'inertie au bâtiment. Un peu moins d'opérations (20 %) sont isolées par l'intérieur, tandis que 22 % sont en isolation intégrée, c'est-à-dire avec isolant entre l'ossature, majoritairement bois (et une métallique).

Dans sept cas, les briques monomurs assurent l'isolation du bâtiment et neuf opérations présentent un double système d'isolation.

L'épaisseur de l'isolation est en moyenne de 18 cm, mais varie de 6 à 36 cm, avec 12 cm pour les isolants bois, 14 cm pour les plastiques alvéolaires, 17 cm pour les laines minérales et 19 cm pour la ouate de cellulose. Dans les constructions en monomur ou isolées par de la paille, les épaisseurs sont encore plus importantes, de 36 cm en moyenne.

Le U des parois varie selon les zones climatiques. En zones H1 et H2, la valeur du U est comprise entre 0,15 et 0,22 W/m².K (résistance thermique entre 4,5 et 7 m².K/W) alors qu'en zone H3, elle est comprise entre 0,25 et 0,35 W/m².K (résistance thermique entre 2,8 et 4 m².K/W).

Illustration 34 – Répartition des modes d'isolation des parois verticales opaques (en nombre d'opérations)



Plus de la moitié des projets sont isolés par l'intermédiaire de laines minérales ou des plastiques alvéolaires. Plus d'un quart des opérations présentent des isolants bio-sourcés et 12 % des bâtiments de la brique monomur.

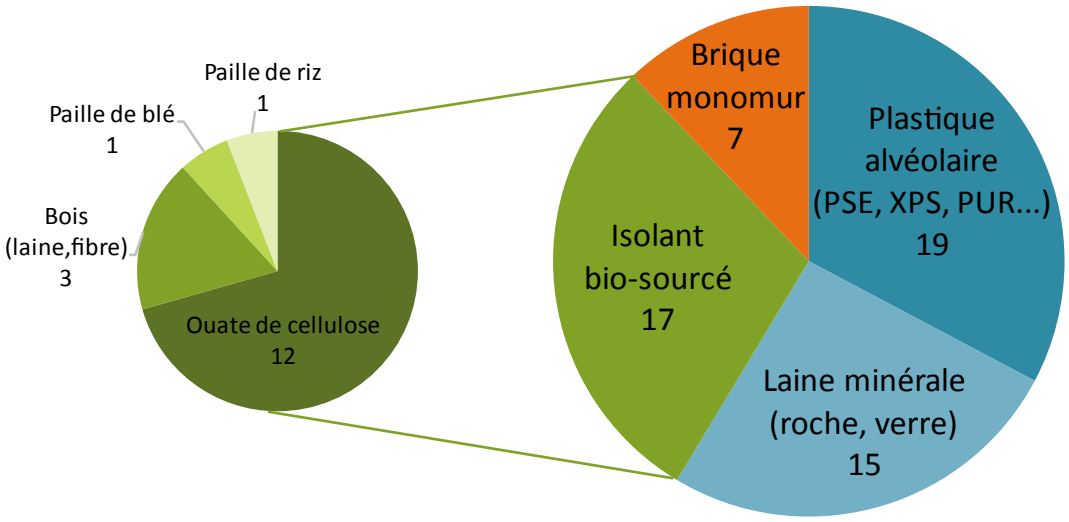
L'association structure béton, isolation par l'extérieur avec un plastique alvéolaire est rencontrée en habitat collectif et en bureaux. L'isolation par l'intérieur est généralement réalisée avec des matériaux conventionnels tels que les plastiques alvéolaires ou la laine minérale.

L'ossature bois est associée, dans plusieurs cas, à des isolants bio-sourcés en vrac qui se mettent facilement en place dans des caissons. Cette isolation intégrée recourt ainsi à de la ouate de cellulose, parfois de la laine de bois et des isolants bio-sourcés moins habituels 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 de par 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 35 – Les isolants des parois verticales opaques (en nombre d'opérations)



4.1.2 L'isolation des planchers bas

Au sein de l'échantillon étudié l'épaisseur de l'isolation du plancher varie peu en comparaison de l'isolation des murs (entre 6 et 16 cm) à l'exception de deux cas d'isolation par de la ouate de cellulose où l'on trouve des épaisseurs de 30 et 36 cm.

Le U des planchers bas diffère peu entre les zones climatiques H2 et H3 : il est compris, pour ces deux zones, entre 0,15 et 0,25 W/m².K. En zone H1, les valeurs sont plus étalées : entre 0,15 et 0,35 W/m².K

L'échantillon présente une légère majorité de bâtiments sur terre-plein. La plupart des planchers bas sont isolés par des plastiques alvéolaires, mais on trouve néanmoins 11 planchers sur vide sanitaire isolés par des isolants bio-sourcés : ouate de cellulose (4 opérations), bois (2 opérations), liège (3 opérations) et paille de riz (1 opération).

4.1.3 L'isolation des planchers hauts

Un peu plus de la moitié des bâtiments de l'échantillon sont pourvus d'une toiture en pente. 20 % des bâtiments ont une toiture-terrasse végétalisée. Près de la moitié des toits sont isolés par de la laine minérale (principalement en combles perdus), près d'un quart des opérations ont recours à de la ouate de cellulose ou d'autres isolants bio-sourcé (polyisocyanurate, laine de chanvre, paille et paille de riz) en combles perdus ou habitables, et 10 opérations sont dotés de plastiques alvéolaires, principalement en toiture-terrasse.

Le U des toitures diffère nettement d'une zone climatique à une autre. En zones H1 et H2, la valeur du U est comprise entre 0,12 et 0,15 W/m².K (soit une très faible dispersion) alors qu'en zone H3, elle est comprise entre 0,18 et 0,27 W/m².K.

4.1.4 L'isolation des baies vitrées

80 % des opérations sont équipées de menuiseries double vitrages, et 20 % de triple vitrage en menuiserie principale. Ces opérations se retrouvent principalement en zone climatique froide (H1). Dans les climats froids, la pose d'un triple vitrage au nord et d'un double vitrage au sud a été réalisée sur quelques opérations.

Comme pour les éléments précédents, on trouve des menuiseries moins performantes en zone H3 (valeur du Uw comprise entre 1,6 et 1,8 W/m².K) que dans les autres zones. En revanche, on trouve ici une différence entre les zones H1 et H2 : les valeurs de Uw sont respectivement comprises entre 1 et 1,6 W/m².K en zone H1 et entre 1,3 et 1,5 W/m².K en zone H2.

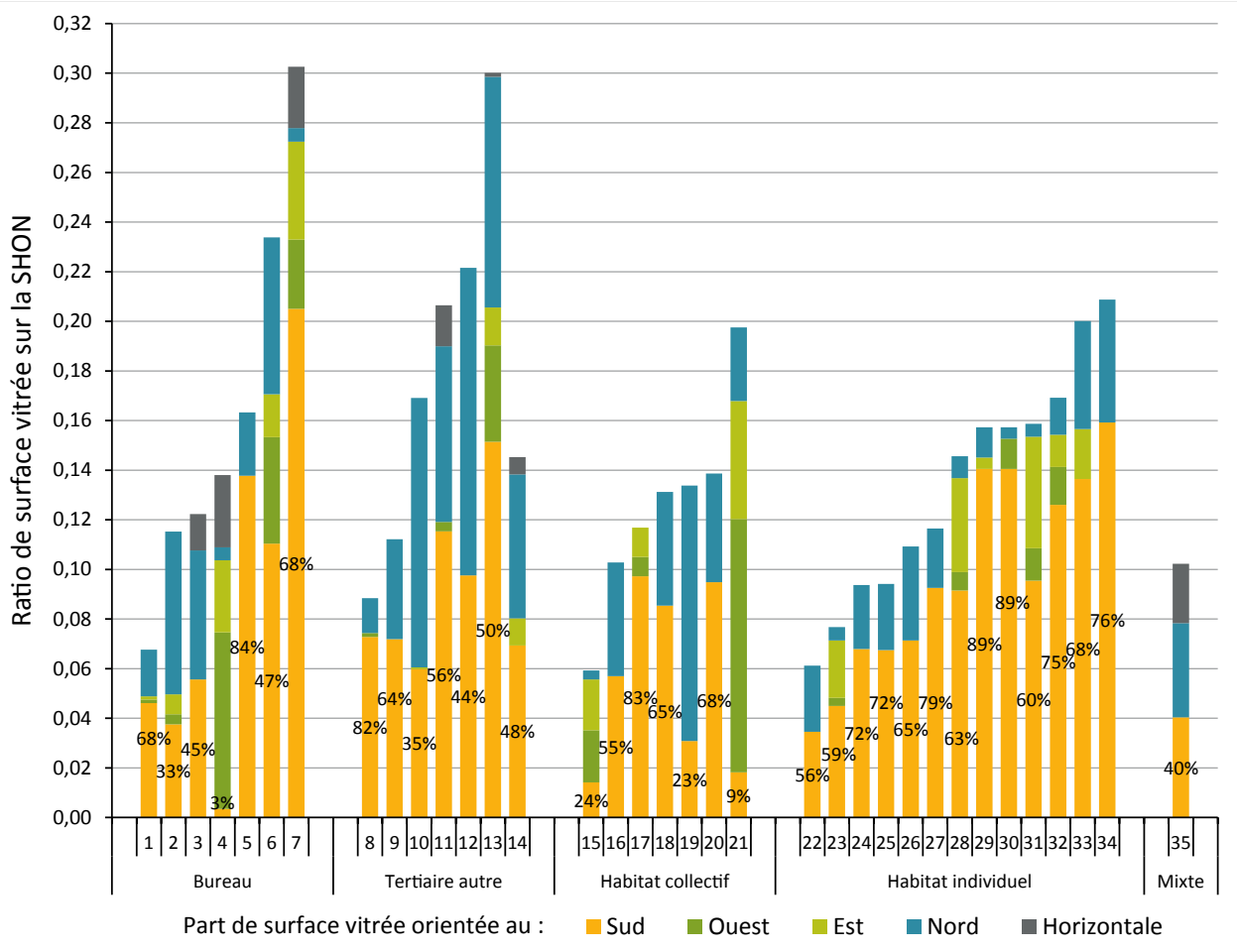
4.2 Conception bioclimatique

Une conception bioclimatique consiste à prendre en compte l'environnement du bâtiment et à tirer le meilleur parti des caractéristiques du site afin de créer un bâtiment naturellement économe et confortable pour ses utilisateurs. Elle consiste généralement à organiser les locaux avec de grandes ouvertures au sud assurant des apports solaires gratuits l'hiver, mais protégées du rayonnement solaire estival par un auvent ou des arbres à feuilles caduques...

Dans l'échantillon étudié, la maîtrise d'œuvre affirme avoir pris en compte le bioclimatisme dans 1/3 des cas (sachant que pour 1/3 des bâtiments l'information n'a pas été renseignée).

Sur le graphique suivant de l'échantillon, on constate effectivement une prépondérance de surface vitrée au sud.

Illustration 36 – Ratio des surfaces vitrées sur la SHON



La conception bioclimatique de bâtiments fortement isolés thermiquement recherche aussi la protection des vents dominants (par la végétation, le semi-enterrement, l'utilisation du relief...).

Concernant les différences constructives en façade nord par rapport aux autres orientations, on retrouve cette volonté sur quelques opérations, souvent couplée à une réflexion sur la répartition et l'orientation des locaux.

Pour des bureaux en Lorraine :

> *« Baies vitrées orientées au sud favorisant les apports solaires en hiver ; locaux techniques au nord, bureaux cotés sud, est et ouest favorisant l'éclairage naturel. »*

Pour un centre culturel en Bretagne :

> *« La forme même de la structure permet de se protéger du vent, et de profiter de l'ensoleillement en hiver tout en le limitant en été. »*

Pour des bureaux en Bretagne :

> *« Ouvertures minimales au nord, enterrement partiel en rez-de-jardin au nord et protection des vents. »*

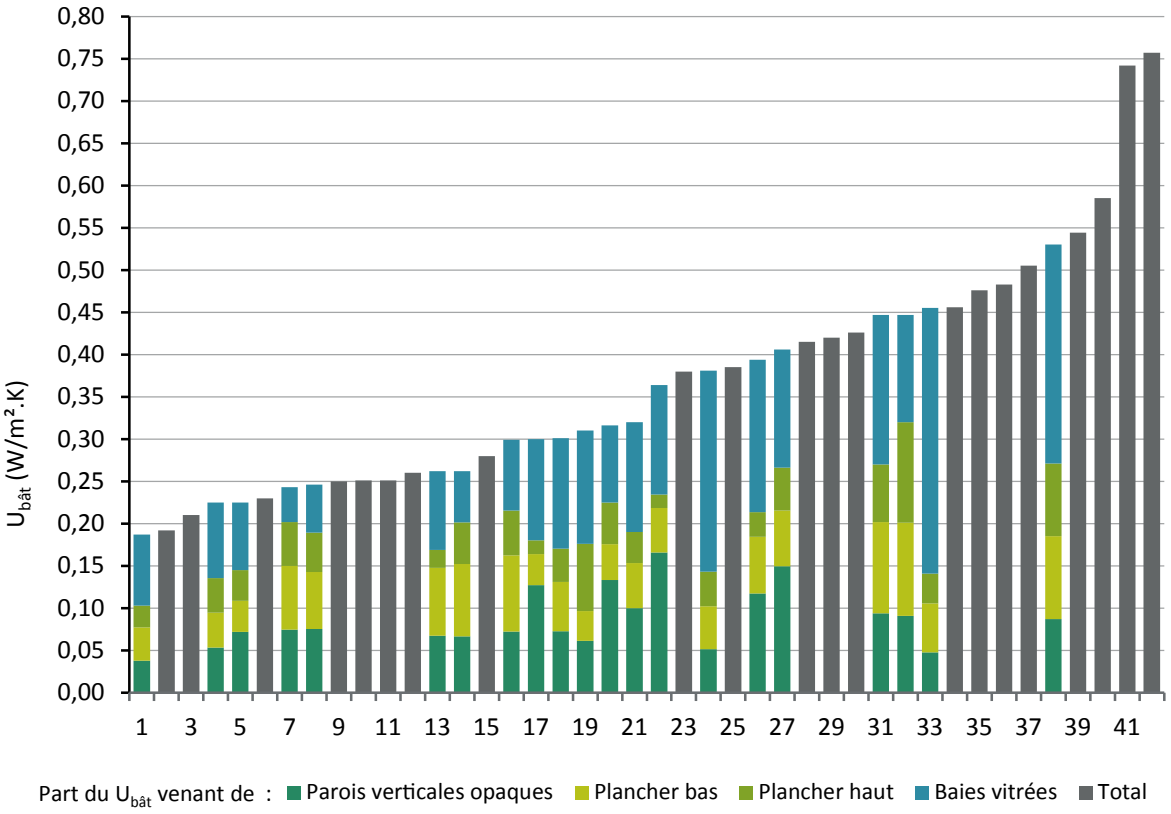
La compacité est également à prendre compte, dans la mesure où elle agit directement sur la surface de déperdition. Une forte compacité a été rencontrée sur un bâtiment de bureaux en Lorraine, dont la forme est cylindrique.

4.3 Isolation thermique de l'enveloppe

4.3.1 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.

Illustration 37 – $U_{bât}$ de l'étude thermique réglementaire et sa composition



Sur un échantillon de 42 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. Ces $U_{bât}$ sont relativement faibles, puisque inférieurs de 20 % en moyenne (de 4 % à 56 %) à leur valeur de référence de la réglementation thermique 2005. Le $U_{bât}$ des bâtiments en zone climatique « chaude » (H3) est globalement plus élevé que celui des bâtiments en zone climatique « froide ».

La plus importante contribution dans le $U_{bât}$ provient, bien évidemment, des déperditions par les baies vitrées. Ainsi, comme le montre l'illustration 37, obtenir un $U_{bât}$ faible passe en premier lieu par le choix de menuiseries peu déperditives.

Pour les autres constituants de l'enveloppe, de manière habituelle et comme vu précédemment, le U du plancher haut est globalement plus faible que le U de la paroi verticale opaque, qui est lui plus faible que le U du plancher bas.

Pour atteindre les $U_{bât}$ les plus faibles, chaque partie de l'enveloppe a été fortement isolée.

De plus, pour obtenir des enveloppes performantes, chaque pont thermique doit être étudié soigneusement (jonctions...), et ce d'autant plus que l'isolation de l'enveloppe est forte.

Pour un bâtiment d'enseignement en Lorraine ($U_{bât}$ = 0,19 W/m².K) :

> *« Les points sensibles tels que les jonctions entre les dormants des menuiseries et les lisses hautes et basses ont été traités. »*

Pour un bâtiment de bureaux en Lorraine ($U_{bât}$ = 0,74 W/m².K) :

> *« Comme attendu, la structure en acier présente de nombreux ponts thermiques. »*

À retenir

Globalement, le niveau d'isolation thermique de l'enveloppe est 20 % supérieur aux valeurs de référence de la réglementation thermique 2005.

4.3.2 Mise en œuvre de l'isolation

Une fois l'enveloppe performante conçue, reste à assurer une bonne mise en œuvre de l'isolant. Cela est globalement le cas sur l'échantillon.

Pour un bâtiment d'enseignement en Bretagne :

> *« La pose de l'isolant a été très soignée, de même que les menuiseries. »*

Pour une maison individuelle en Languedoc-Roussillon :

> *« La densité de l'ossature métallique laissait présager des manques d'isolation par endroits. Mais la pose de l'isolant paraît avoir été soignée. Il a été constaté lors d'une visite en phase de finitions que les découpes nécessaires, aux formes parfois compliquées (triangle), ont été réalisées. »*

Cependant, sur certaines opérations, des difficultés de mise en œuvre ont été constatées :

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

Pour un bâtiment d'enseignement 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. »*

- l'isolant n'est pas mis en place à certains endroits, créant ainsi des ponts thermiques ;

Pour un bâtiment de santé en Bretagne :

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

- l'isolant n'a pas été protégé de la pluie lors du chantier.

Pour un bâtiment d'enseignement en Bretagne :

> *« L'isolant a été posé sur les murs extérieurs avant que l'étanchéité à l'eau ne soit totale. En cas de pluie, l'eau a pu dégrader les performances thermiques de l'isolant. »*

À retenir

Les ponts thermiques ne sont toujours pas suffisamment pris en compte lors de la conception et lors de la pose.

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

Le coefficient $U_{bât\ évalué}$ 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.

Le $U_{bât\ évalué}$ apparaît ici plus élevé que le $U_{bât}$ de l'étude thermique réglementaire, et ce jusqu'à 60 % (cf. Illustration 38).

Les écarts entre le $U_{bât\ évalué}$ et le $U_{bât}$ ont plusieurs origines constatées lors des visites de chantier et par thermographie, sans toutefois avoir pu être quantifiées individuellement :

- la qualité des études thermiques (détermination précise des ponts thermiques structurels et singuliers, en particulier pour les structures métalliques et les bardages) ;
- le changement de matériaux et de caractéristiques pendant le chantier par rapport aux prescriptions du CCTP (comme l'isolation du plancher bas) ;
- la qualité de la mise en œuvre : présence de zones humides qui dégradent la performance de l'isolation, isolation insuffisante des linteaux des baies vitrées, des volets roulants ou des acrotères, épaisseur des joints monomur…

Par ailleurs, les écarts peuvent s'expliquer par de mauvaises conditions de mesure du $U_{bât\ évalué}$, notamment des températures extérieures pas assez basses ou trop d'ouvertures de fenêtres, ce qui amène à prendre ces résultats avec précautions.

Pour une maison individuelle en Languedoc-Roussillon :

> *« Le débit d'air provenant des ouvertures des fenêtres n'a pas pu être pris en compte. L'impact des masques végétaux et de la fermeture des occultations par les occupants n'est pas évalué. »*

Illustration 38 – Les coefficients de déperdition $U_{bât}$ et $U_{bât\ évalué}$

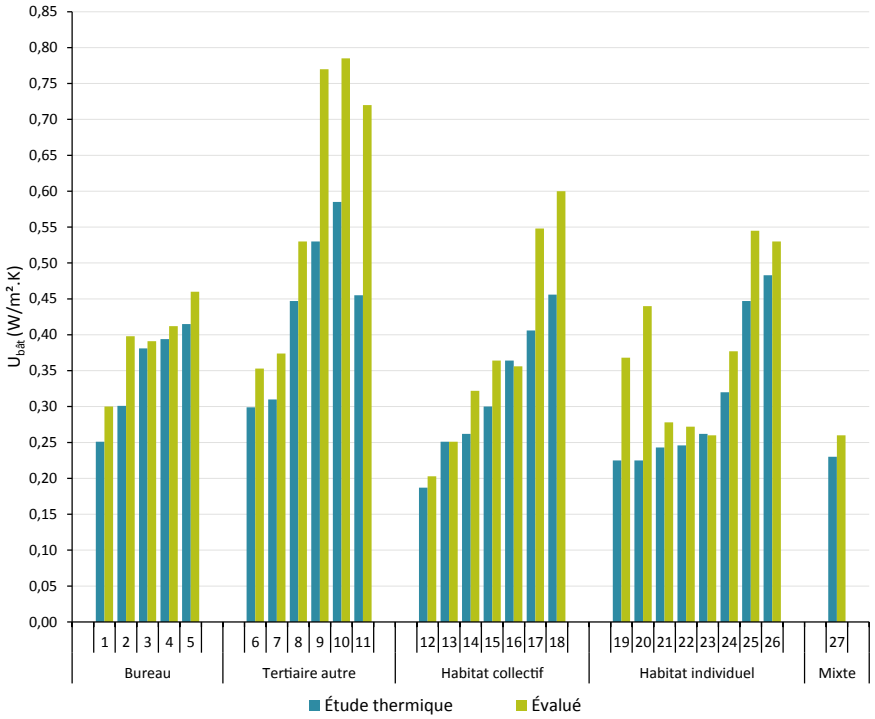
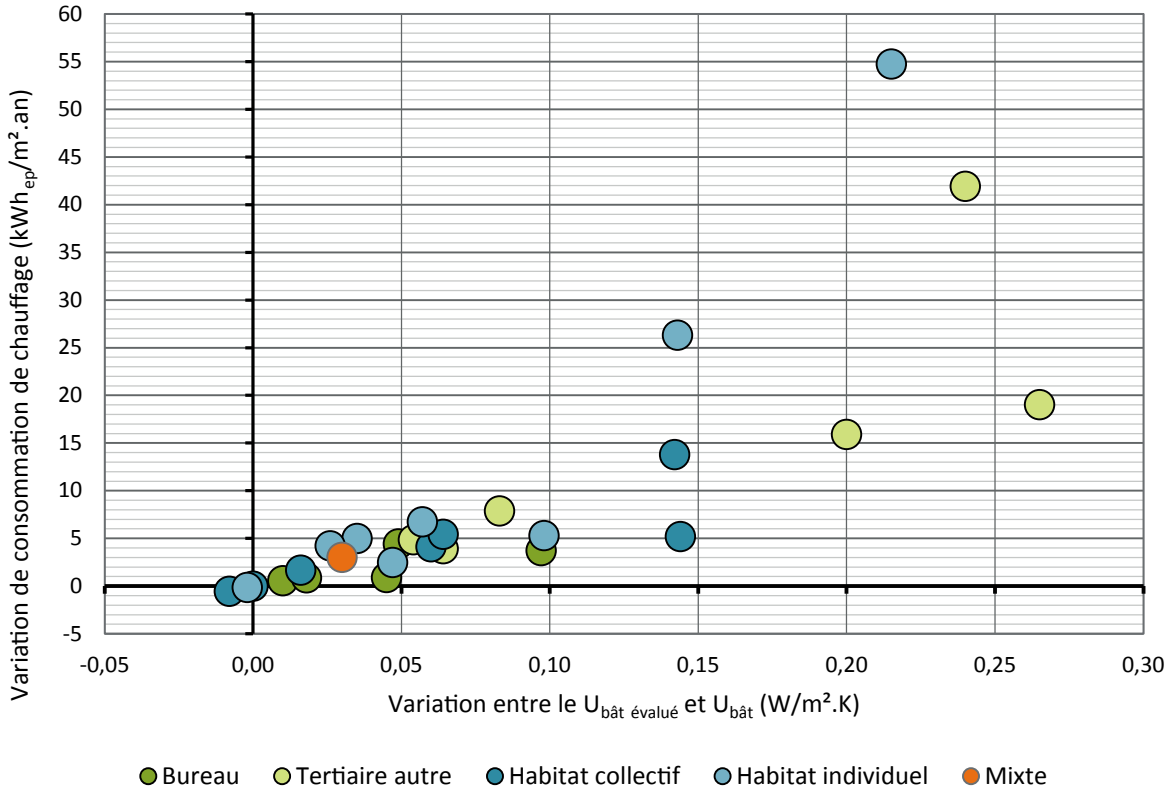


Illustration 39 – Évolution de la consommation de chauffage après recalcul avec $U_{bât\ évalué}$



4.3.4 Impact calculé du $U_{bât\ évalué}$ sur la consommation de chauffage

Les consommations de chauffage de l'étude réglementaire ont été recalculées avec les $U_{bât\ évalué}$ (cf. Illustration 39).

Nous pouvons alors constater que la consommation de chauffage est directement sensible au $U_{bât}$, avec des augmentations relativement fortes par rapport à l'étude thermique réglementaire, jusqu'à 19 $kWh_{ep}/m².an$, valeur de la crèche exclue.

Plus généralement, nous pouvons en déduire que dans les bâtiments fortement isolés thermiquement, la consommation de chauffage est très sensible, en relatif, à toute variation de performance d'isolation de l'enveloppe : une augmentation de 20 % du $U_{bât}$ entraîne une augmentation de 30 % de la consommation de chauffage.

À retenir

La méthode mise en place par le Cerema, qui reste à consolider, laisserait apparaître un écart systématiquement négatif 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.

4.4 Perméabilité à l'air de l'enveloppe

Perméabilité à l'air mesurée

Dans la méthode Th-CE 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 (cf. Illustration 40), l'étude thermique réglementaire s'est souvent contentée de la valeur par défaut (Q_{4P_surf} = 1,7 m³/h.m²).

Par contre, les bâtiments d'habitation ont visé le niveau du label BBC Effinergie ou l'exigence de la RT 2012 pour la maison individuelle neuve ($Q4_{P\_surf}$ = 0,6 m³/h.m²), voire le niveau du label « Passivhauss » (Q_{4P_surf} < 0,2 m³/h.m²).

L'étanchéité à l'air mesurée est généralement satisfaisante. Elle est même inférieure à 1 m³/h.m² pour 2/3 des bâtiments.

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, interrupteur...), des éléments traversant les parois, les sols (adduction d'eau potable, évacuation 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. »*

Impact calculé de la perméabilité à l'air mesurée sur la consommation de chauffage

Les consommations de chauffage de l'étude réglementaire ont été recalculées avec les perméabilités à l'air mesurées (cf. illustration 41).

L'impact calculé sur la consommation de chauffage est en général modéré (moins de 30 %, soit moins de 5 kWh_{ep}/m^2.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 40 %, augmenterait la consommation de chauffage à hauteur de 10 %.

Par contre, l'impact peut être très bénéfique, comme pour cette opération en Bretagne qui réduit sa consommation de près 15 kWh_{ep}/m^2.an en baissant sa perméabilité de l'indice de référence 1,7 à 0,7.

À retenir

L'étanchéité à l'air est globalement bien réalisée sur les bâtiments de l'échantillon.

Les pertes énergétiques par infiltration d'air restent ainsi limitées.

Illustration 40 – Les perméabilités à l'air mesurées et leur valeur visée dans l'étude thermique réglementaire

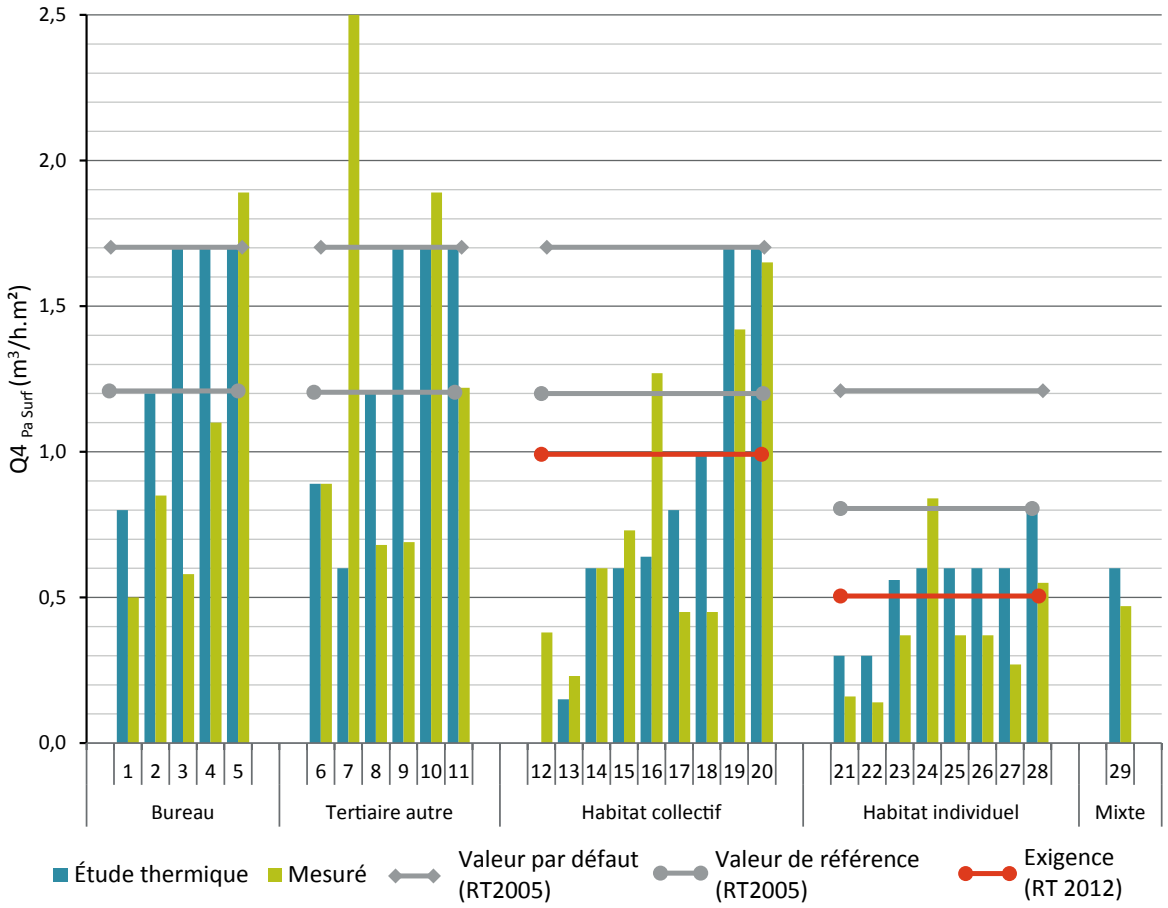
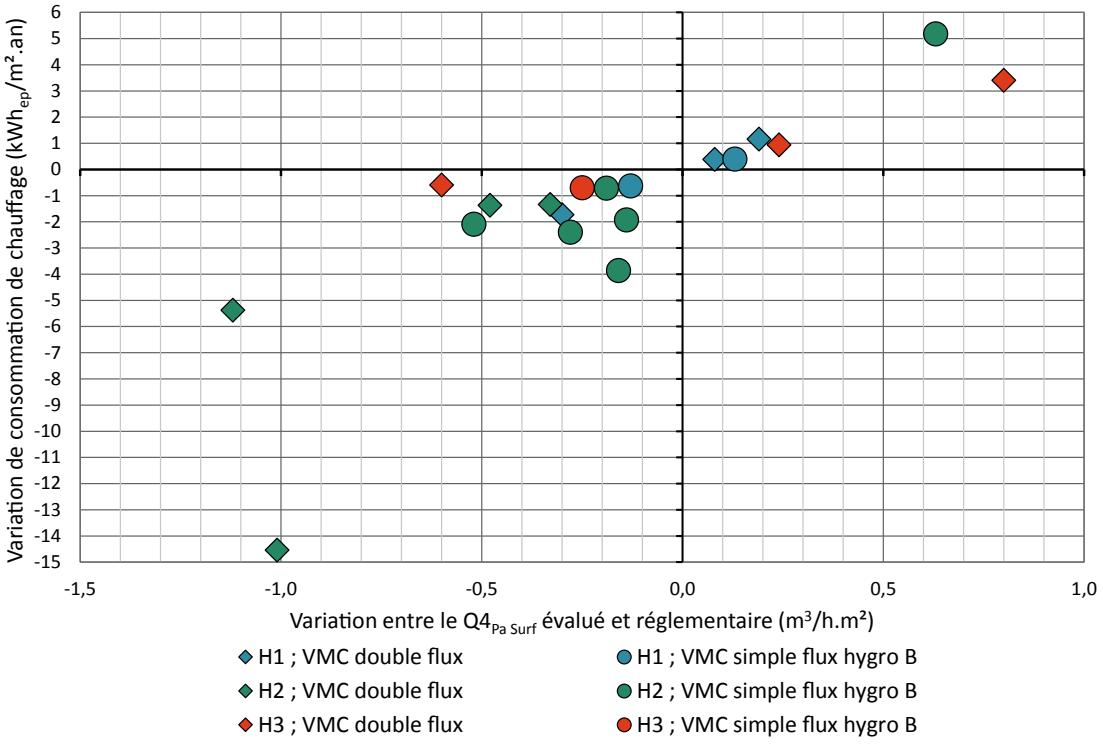


Illustration 41 – Évolution de la consommation de chauffage après recalcul avec la perméabilité à l'air mesurée



© Cerema

5

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 les pompes, 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 pourrait permettre de réduire ces pertes qui contribuent certes au chauffage l'hiver, mais sont des sources de chaleur non souhaitables l'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 à la fois 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 ; ils 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.

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

5.1 Chauffage

5.1.1 Des générateurs de chaleur performants mais parfois surdimensionnés

Deux grandes familles de générateurs de chaleur assurent le chauffage dans les bâtiments de l'échantillon étudié (cf. Illustration 42) :

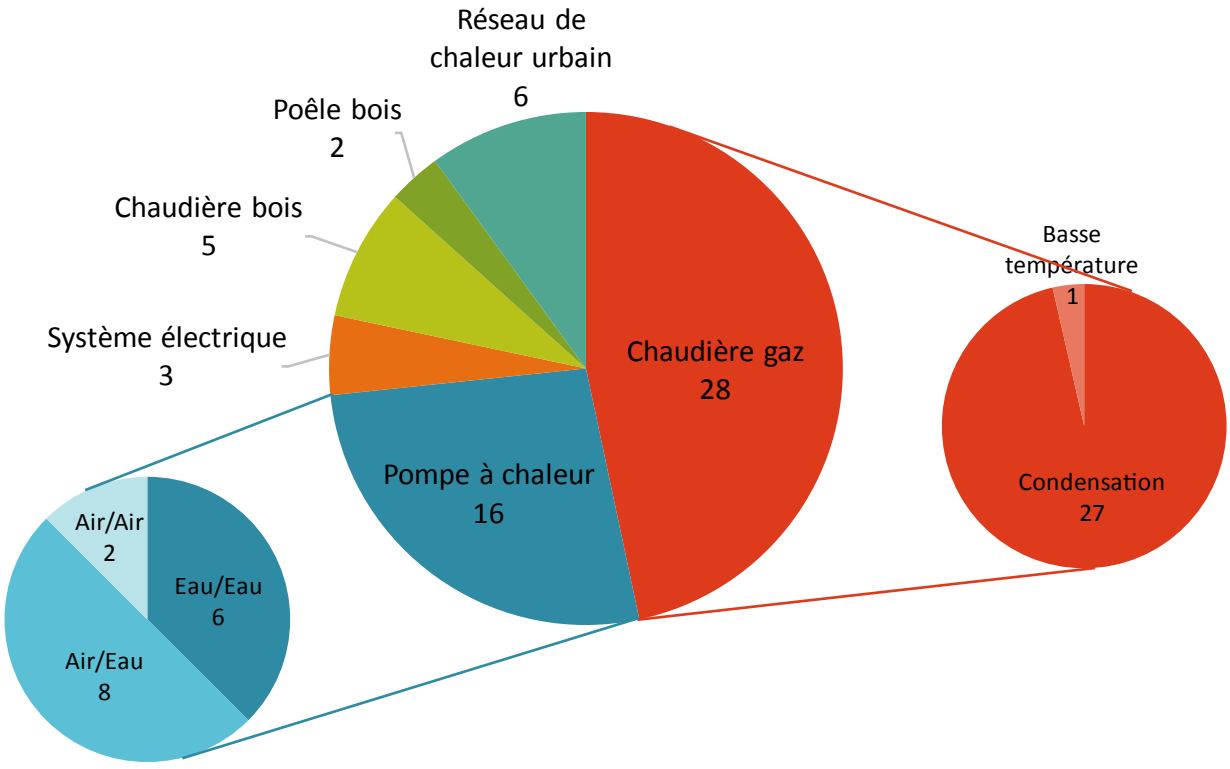
- les chaudières gaz à condensation principalement installées dans les logements (20 bâtiments de logements sur 36 et 8 bâtiments tertiaires sur 24) ;
- les pompes à chaleur (PAC), principalement installées dans les bureaux et les autres bâtiments tertiaires (11 bâtiments tertiaires sur 24 et 5 bâtiments de logements sur 36). Parmi les pompes à chaleur, on retrouve essentiellement des PAC air/eau et des PAC eau/eau (c'est-à-dire PAC géothermique), ainsi que deux PAC air/air. Parmi les PAC, un équipement innovant est utilisé, il s'agit d'un système multi-fonction (tour compacte assurant le chauffage, l'ECS et la ventilation) installé dans un bâtiment de logement.

Ont été mis en place dans une moindre mesure des chaudières bois (cinq chaudières avec pour combustible granulés, bois déchiqueté ou plaquettes) ou poêles bois (deux opérations).

Deux maisons individuelles sont chauffées par des radiateurs électriques. Un bâtiment de logement collectif est doté d'un système de chauffage intégré au système de ventilation. Le chauffage de l'air insufflé se fait par des batteries chaudes électriques.

Enfin, cinq bâtiments sont chauffés via un réseau de chaleur urbain (deux tertiaires et trois bâtiments de logements).

Illustration 42 – Répartition des différents types de production de chaleur (en nombre d'opérations)

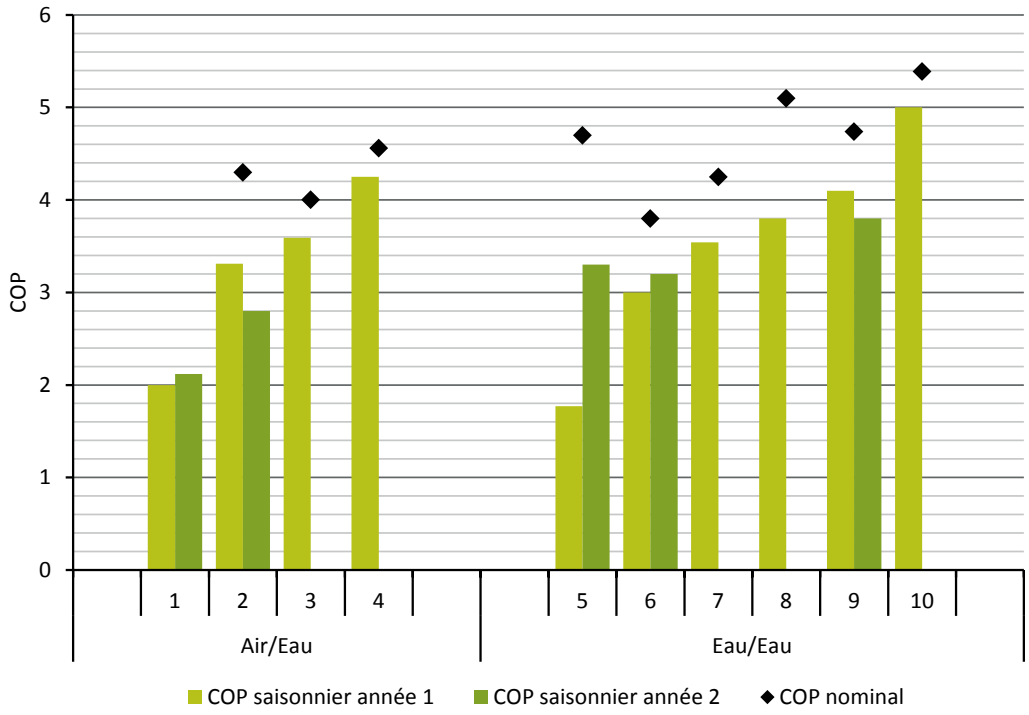


Des pompes à chaleur qui fonctionnent souvent en cycles courts

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 de la consommation du compresseur de la PAC. Ce COP saisonnier comprend donc la consommation des circulateurs.

Dans l'attente d'une capitalisation approfondie sur les COP, nous présentons ici les COP saisonniers issus des mesures de consommation lors de la première et de la deuxième année, ainsi qu'à titre indicatif le COP nominal de la PAC installée.

Illustration 43 – COP saisonnier évalué à partir des mesures et COP nominal



Le COP nominal saisi dans le calcul RT et le COP saisonnier mesuré ne correspondent pas aux mêmes conditions de températures amont et aval.

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 températures 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 maîtrisés et les mesures sont réalisées sur l'ensemble de la saison de chauffe.

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 bons : proches de 3, voire atteignant 4 à 5 pour les meilleurs systèmes.

Dans trois cas sur cinq, le COP mesuré est plus performant lors de la deuxième année que lors de la première. Le réglage de la PAC permet d'améliorer ses performances.

Pour le bâtiment de bureau n° 5 de l'illustration 43 :

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

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 a permis de limiter ces cycles trop courts qui dégradent fortement le COP et peuvent détériorer le compresseur (surchauffe).

Enfin, pour les PAC air/eau, 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 deux cas (bureaux), 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 :

> *« Les performances de la pompe à chaleur air/eau sont plus faibles que prévu : 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. »*

Pour un immeuble de bureaux en Rhône-Alpes :

> *« Une pompe à chaleur démarre et s'arrête trop souvent. Ces enclenchements répétitifs entraînent une surchauffe du moteur et des baisses de rendement. Le temps de fonctionnement n'est pas suffisant pour évacuer cet excédent de chaleur. De plus, le délai d'arrêt entre deux cycles n'est pas suffisant pour protéger le compresseur. »*

À retenir

Le coefficient de performance moyen mesuré sur la saison (COP saisonnier) des pompes à chaleur (PAC) est supérieur à trois pour la plupart, voire plus avec un bon réglage des systèmes.

Des PAC air/eau sont installées en climats froids, lesquels ne constituent pourtant pas un bon environnement pour leur performance. Celle-ci se dégrade d'autant plus qu'elles sont amenées à fonctionner plus souvent à ces températures, de par les besoins réduits des bâtiments à basse consommation.

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.

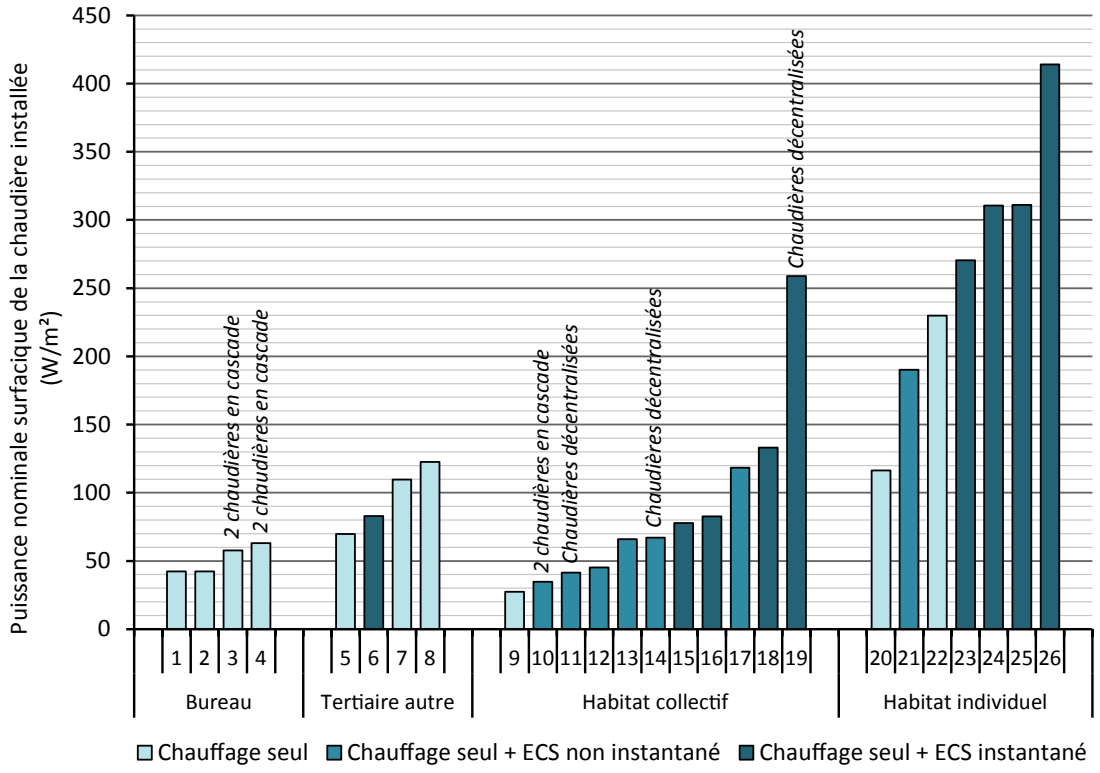
Des chaudières gaz à condensation qui fonctionnent souvent à faible puissance

Comme pour les PAC, on peut observer un surdimensionnement relativement courant de ces systèmes, souvent dicté par le besoin de produire de l'eau chaude sanitaire instantanément. Les puissances observées n'atteignent pas ou peu la puissance nominale. Dans ces conditions, les chaudières de l'échantillon fonctionnent sur des cycles courts même en présence d'un brûleur modulant. Les pertes au démarrage et à l'arrêt sont exacerbées et la récupération sur la condensation est plus faible.

La puissance nominale des chaudières installées est globalement plus importante lorsque la surface de l'opération est élevée, comme pour les bâtiments tertiaires ou les habitations collectives, et ce même en la ramenant à la surface (cf. Illustration 44). Elle est plus importante pour les maisons individuelles ou systèmes équivalents (chaudière individuelle[12]) que pour les bâtiments d'habitat collectif et tertiaire.

Dans de nombreux cas et principalement pour les maisons individuelles, une puissance plus faible de chaudière aurait probablement pu être installée. Le marché des chaudières gaz condensation propose toutefois peu de chaudières à faible puissance.

Illustration 44 – Puissance nominale surfacique des chaudières gaz installées



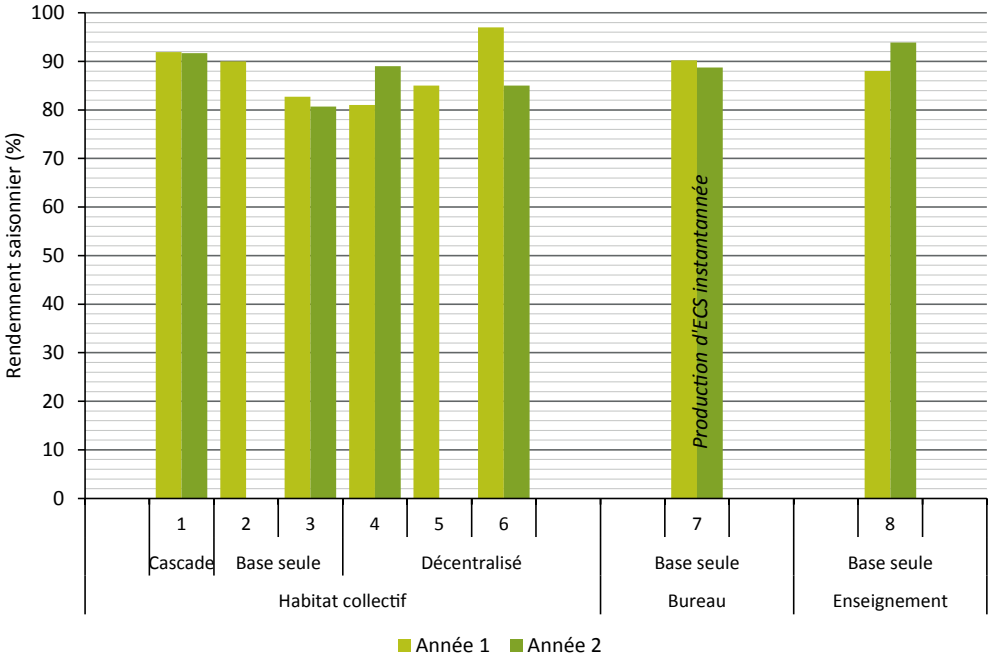
À retenir

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

12. Les faibles puissances surfaciques des opérations n° 11 et 14 sur l'illustration 44 s'expliquent par l'apport de chaleur de panneaux solaires thermiques.

La performance d'une chaudière s'évalue par l'intermédiaire de son rendement. Lors des suivis d'opération, le rendement saisonnier des chaudières gaz à condensation, qui est bien évidemment différent du rendement nominal[13], a été mesuré.

Illustration 45 – Rendement saisonnier des chaudières gaz



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

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

À retenir

Les pertes thermiques des réseaux sont encore très importantes, notamment au niveau des organes de régulation, avec un enjeu plus important pour les réseaux bouclés.

5.1.3 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 en sortie de chaudière 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 standard).

13. 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.

Le plancher chauffant est le choix numéro deux des maîtres d'ouvrage (¼ 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. Par contre, 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 (8 sur 58) ont fait le choix de mettre en place des émetteurs à faible inertie tels que des résistances électriques (1 opération) ou à eau chaude (7 opérations) dans les gaines de ventilation ou des radiateurs électriques (2 opérations).

À retenir

Un fonctionnement optimal des chaudières gaz à condensation et des PAC est obtenu lorsque la température de départ et de retour sont faibles. Les radiateurs basse température ou plancher chauffant facilitent ces conditions.

Les systèmes de chauffage réactifs, notamment avec émetteurs à faible inertie, répondent mieux aux besoins de chauffage faibles et ponctuels propres aux bâtiments basse consommation.

5.1.4 Des systèmes de régulation qui posent parfois des problèmes

Une régulation centrale 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, mais quatre opérations 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 :

  > *« 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 ;

  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.

  Pour une habitation collective en Bretagne :

  > *« La loi d'eau de la chaudière n'est pas optimisée. Les circulateurs fonctionnent donc toute l'année. »*

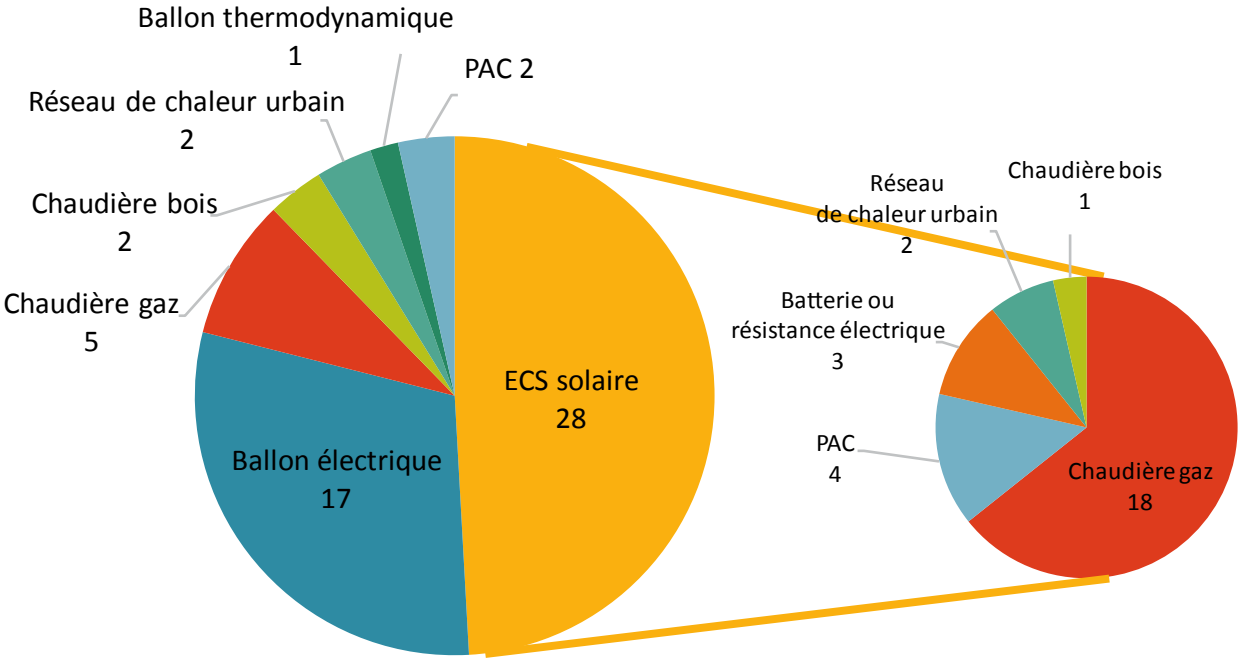
5.2 Eau chaude sanitaire

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 (28 bâtiments sur 60). La chaudière gaz en place assure l'appoint dans deux tiers des cas. Dans deux bâtiments d'habitation, le complément est assuré par le réseau de chaleur.

De façon générale, dans les bâtiments tertiaires, l'ECS est produite par des ballons électriques décentralisés placés au plus près du puisage.

Illustration 46 – Répartition des différents types de production d'ECS (en nombre d'opérations)



Plus 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 thermodynamique.

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 ; en été, une chaudière gaz 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 (28 sur 33) 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. Bien que les besoins en ECS de ces bâtiments ne soient pas pris en compte par la réglementation thermique 2005, la mesure montre que leurs consommations sont loin d'être négligeables (cf. illustrations 15, 16 et 47).

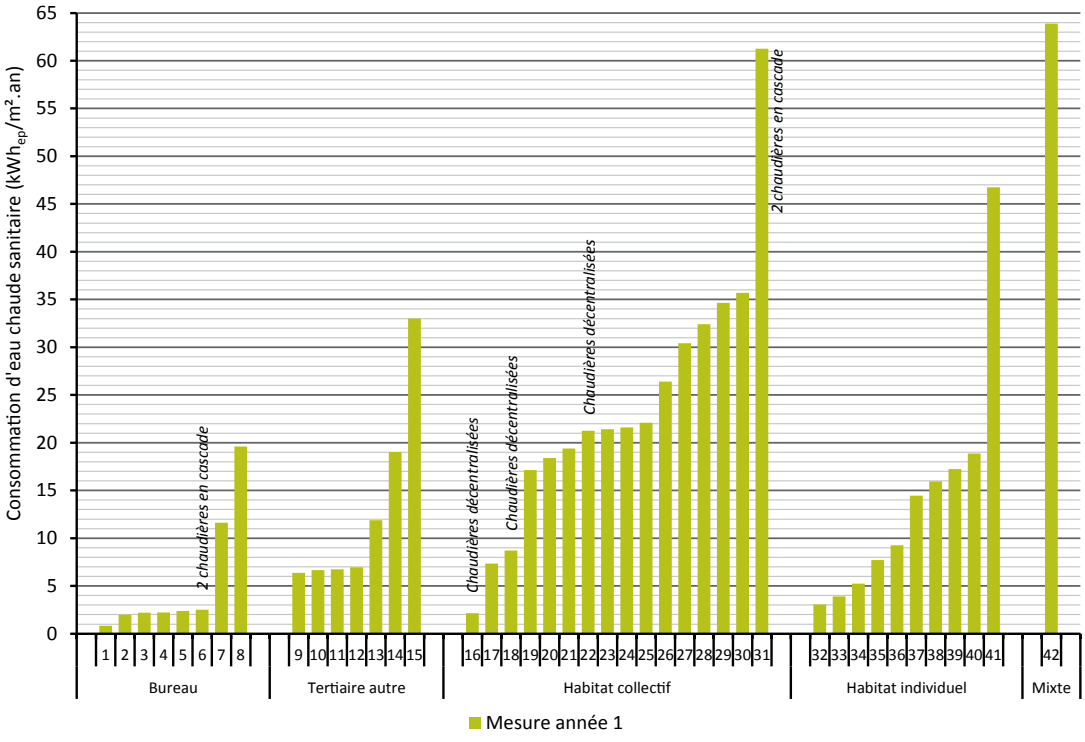
En ce qui concerne la distribution entre la production et le puisage, trois cas de figure sont représentés :

- la production en volume habitable chauffé. Elle est exclusivement rencontrée en maison individuelle groupée, mais apparaît également en tertiaire et en logement collectif lorsque la production est effectuée en décentralisé au plus près du puisage ;
- la production centralisée avec bouclage. Elle est très fortement représentée en logement collectif (10 opérations sur 12), généralement imposée par le recours aux panneaux solaires thermiques ;
- la production centralisée hors volume chauffé. Elle est présente sur seulement 5 opérations de l'échantillon.

5.2.2 Des consommations d'énergie très variables

Les consommations d'énergie pour la production d'ECS sont très variables en fonction des opérations. Les bâtiments d'habitation collectifs sont les plus consommateurs en kWh d'énergie primaire par m², suivis des maisons individuelles. Si les tertiaires de type bureau sont peu consommateurs, certains tertiaires de bureau se situent en termes de consommation au même niveau que les logements. Les bâtiments tertiaires de type crèche ou EHPAD ont des besoins d'ECS comparables aux logements.

Illustration 47 – Consommation mesurée d'eau chaude sanitaire



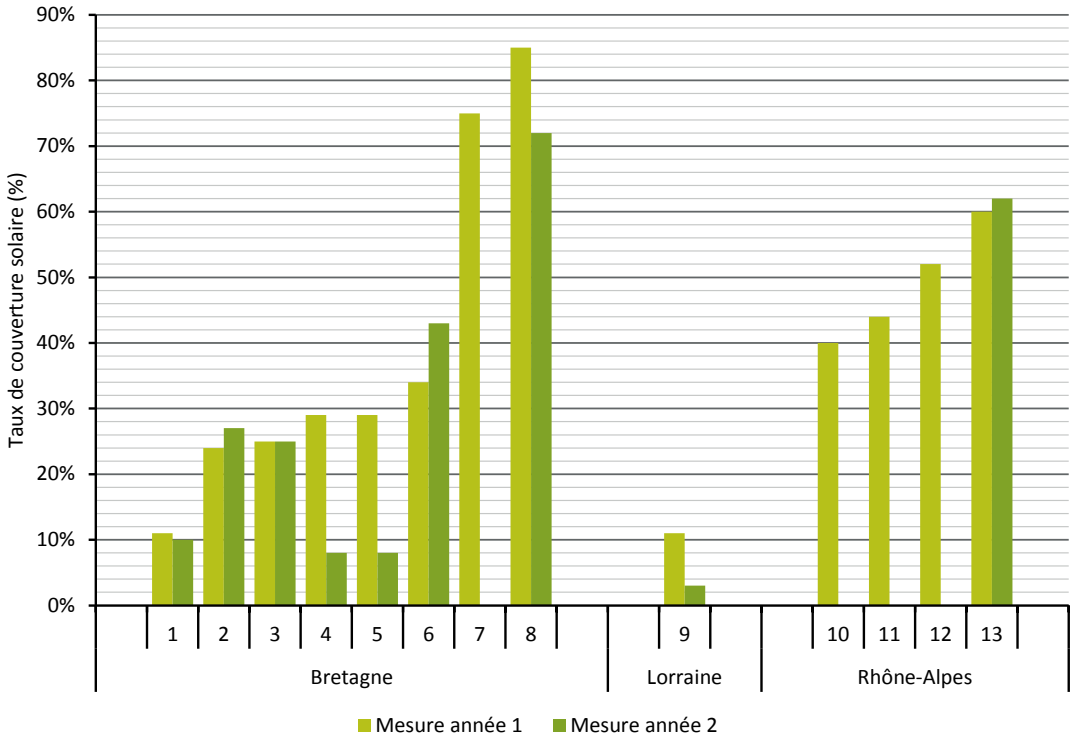
La présence de panneaux solaires thermiques permet dans la majorité des cas de réduire les consommations, néanmoins on trouve des bâtiments sans ECS solaire moins consommateurs que certains ayant de l'ECS solaire. C'est particulièrement le cas en logement collectif, où l'ECS solaire requiert l'emploi de systèmes centralisés générateurs de pertes de stockage et de bouclage.

Certains bâtiments ont des consommations d'énergie pour l'ECS anormalement élevées, des dysfonctionnements en sont généralement la cause : ainsi, pour l'opération n °31, les pertes de bouclage représentent 40 % de la consommation ; pour le bâtiment n °41, un dysfonctionnement de l'ECS solaire explique l'écart avec les autres maisons individuelles.

5.2.3 Des productions solaires à maîtriser

Les taux de couvertures solaires observés sont très disparates, et ce quelle que soit la région. En Rhône-Alpes, les taux de couverture solaires se situent entre 40 et 60 %. En Bretagne, les écarts sont plus importants. Les faibles taux de couverture solaires sont notamment à attribuer à des dysfonctionnements des systèmes (solaire n'ayant pas fonctionné une partie de l'année, pannes...). Une opération affichait un taux de couverture solaire de 100 %, mais cela résultait d'une panne de l'appoint. La production solaire est également très variable en fonction des saisons, les pics de production ne coïncident pas avec la demande.

Illustration 48 – Les taux de couverture solaire observés sur l'année 1 et sur l'année 2



Le taux de couverture solaire est également fortement lié au besoin d'ECS : les bons résultats de l'opération de logements n° 8 sont dus à des besoins réels deux à trois fois inférieurs aux valeurs de l'étude thermique réglementaire pour lesquelles les systèmes ont été dimensionnés. À l'inverse, le faible taux de couverture solaire constaté sur l'opération n° 9 provient d'un dysfonctionnement d'une pompe de circulation du circuit solaire, limitant la quantité d'énergie solaire récupérée.

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 a priori. 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. »*

Retour d'enquête pour un logement :

> *« 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. »*

Les systèmes solaires utilisés dans les bâtiments d'habitation collectifs imposent souvent l'emploi du stockage centralisé, et du bouclage (comme souvent en production non individuelle). Ces deux techniques ne sont pas toujours maîtrisées, 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. Le stockage d'énergie n'est utilisé qu'à moitié et les pompes des panneaux solaires s'arrêtent prématurément. Il s'en suit un faible apport solaire et une surchauffe des panneaux l'après-midi car la régulation considère que le stockage est rempli. »*

> *« 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. »*

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. On constate (avec une certaine surprise, et de manière systématique) que les volumes de pointe réels à 10 minutes sont entre 2,2 et 3,8 fois inférieurs aux méthodes de dimensionnement et que les débits à l'heure, le sont entre 1,3 et 2,7 fois. Il s'agit donc d'écarts très importants entre les débits de pointe réels et ceux obtenus par les méthodes de dimensionnement traditionnelles. Celles-ci surdimensionnent la puissance et le stockage nécessaires à la production d'eau chaude sanitaire, ce qui a pour effet de réduire le rendement de génération de chaleur déjà très faible en été, et d'entraîner un surcoût de l'installation. »*

Les cas suivants illustrent un taux de couverture solaire plus faible que prévu en habitat collectif :

> *« 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. Le stockage d'énergie n'est utilisé qu'à moitié et les pompes des panneaux solaires s'arrêtent prématurément. Il s'en suit un faible apport solaire et une surchauffe des panneaux l'après-midi car la régulation considère que le stockage est rempli. »*

> *« 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. »*

5.2.4 Des distributions aux pertes non négligeables

Les mesures de consommation 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 représentent jusqu'à 100 % des besoins en ECS.

Dans des bâtiments d'habitation 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 discontinue 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 besoins en 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 :

> *« Le rendement annuel de génération de chaleur pour l'ECS est donc de 41 %. Ce résultat n'est pas bon. La demande en eau chaude sanitaire a baissé de 8 % entre l'année 1 et l'année 2. »*

À retenir

Les consommations énergétiques d'ECS varient fortement avec les besoins en eau chaude, le mode de production (collectif / individuel, à accumulation / instantané) et le type de générateur.

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, de par les pertes de bouclage et de stockage. Celles-ci pourraient être mieux maîtrisées, notamment par un calorifugeage plus poussé des réseaux.

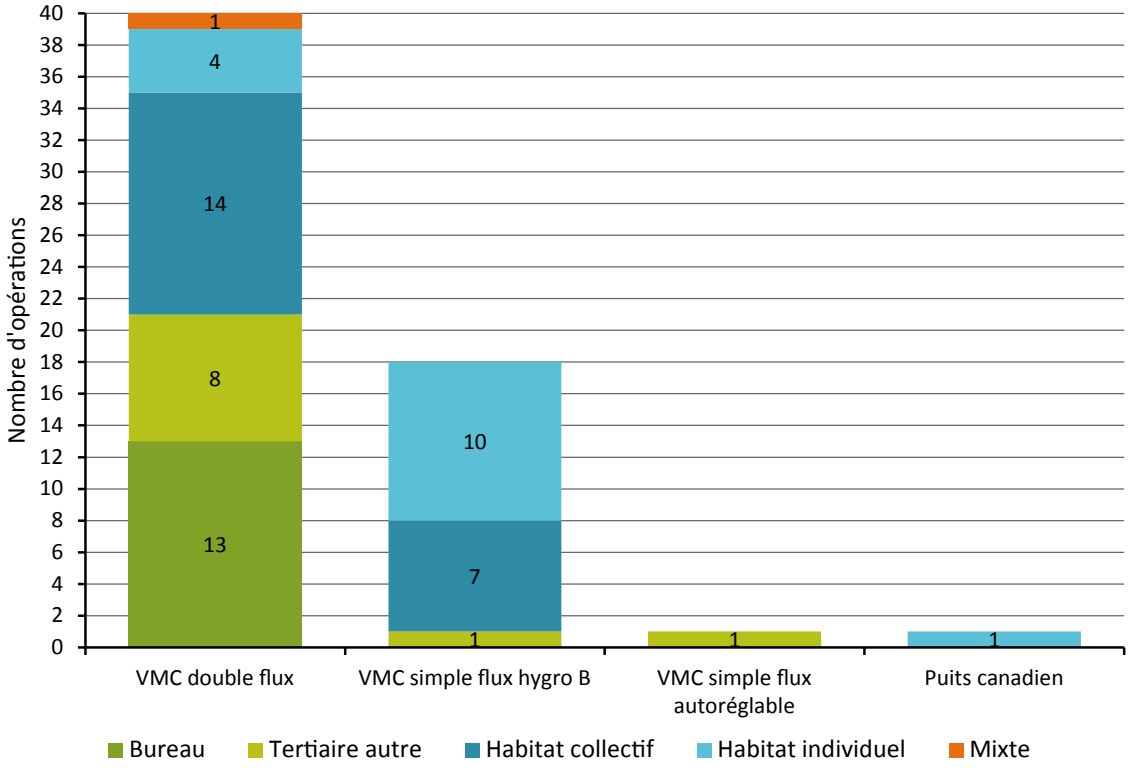
Dans les bâtiments tertiaires de type bureau ou enseignement, des ballons électriques sont systématiquement rencontrés, avec une consommation non négligeable.

5.3 Ventilation

5.3.1 Une prédominance des systèmes double flux dans l'échantillon

Dans l'échantillon de la capitalisation 2015 (constitué majoritairement de lauréats des appels à projets 2008, 2009 et 2010), on constate une prédominance des systèmes de ventilation double flux (68 %) et une installation systématique dans les bâtiments de bureaux. Le type d'échangeur le plus couramment utilisé est l'échangeur à plaques avec flux croisé (52 %), suivi de l'échangeur à roue (42 %). L'échangeur à plaques avec des flux non croisés n'est utilisé que dans deux opérations. Il faut noter que dans notre échantillon les systèmes double flux sont autant présents dans les rénovations (69 %) que dans les constructions neuves (65 %).

Illustration 49 – Les systèmes de ventilation installés par fonction de bâtiments



Viennent ensuite les systèmes de ventilation simple flux hygroréglable de type B (30 % dont 95 % installés dans les logements individuels et collectifs). Des ventilations simple flux autoréglables sont installées dans 2 % des cas (un logement individuel et un bâtiment d'enseignement). Les ventilations simple flux hygroréglables de type A sont absentes de notre échantillon.

13 bâtiments tertiaires sur 24 présentent un deuxième système de ventilation (le premier étant toujours une ventilation double flux), pour assurer la ventilation des sanitaires ou d'une zone plus réduite du bâtiment. Dans ces seconds systèmes, on retrouve 1 système hygro A, 4 systèmes hygroréglables de type B et 5 systèmes 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'entrée d'air est pré-chauffée, mais il n'y a pas de récupération sur l'air extrait.

Un bâtiment tertiaire a également sa ventilation double flux couplée avec un puits canadien, mais ce dernier étant inondé, il n'a jamais été utilisé.

5.3.2 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 de 10 à 12 $kWh_{ep}/m^2.an$ a été obtenue avec une efficacité de 70 à 80 %. »*

Des efficacités très souvent supérieures à 70 %

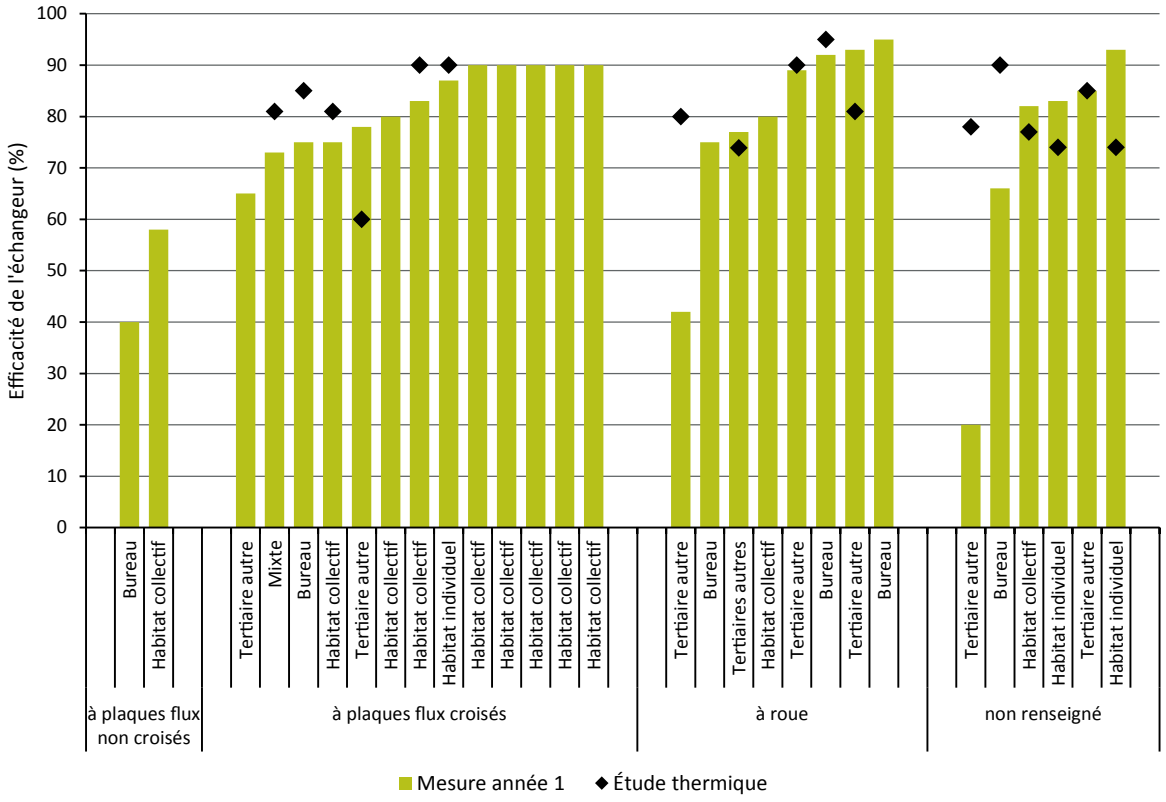
L'efficacité mesurée des échangeurs de chaleur est le plus souvent supérieure à 70 %. Dans deux cas sur trois où l'efficacité est inférieure à 60 %, des dysfonctionnements ont pu être observés. Dans le cas du bâtiment mixte, la performance affichée par le constructeur est de 62 % et l'échangeur est by-passé dès que la température extérieure est de 13 °C (température assez faible pour un by-pass).

Pour un bâtiment d'enseignement en Rhône-Alpes :

- *« Un des trois échangeurs n'a pas fonctionné pendant plus de 80 % du temps. »*

Globalement, les échangeurs tiennent leurs promesses par rapport à leur valeur indiquée dans l'étude thermique réglementaire.

Illustration 50 – Efficacité des échangeurs double flux

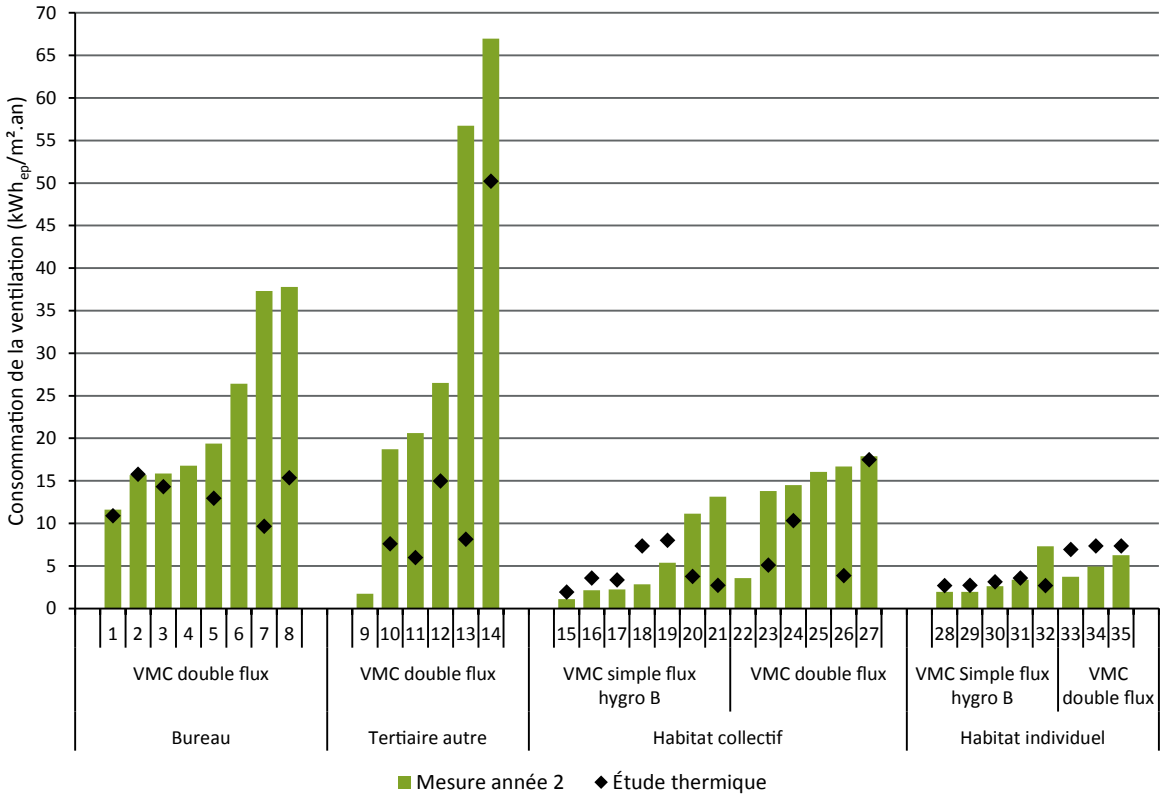


5.3.3 Des consommations plus élevées en double flux

La consommation des ventilateurs en simple flux hygroréglable (en habitat) est généralement inférieure à 10 $kWh_{ep}/m^2.an$, et peut descendre à 3 $kWh_{ep}/m^2.an$.

Par contre, elle est généralement plus élevée en double flux, venant réduire l'intérêt des gains thermiques obtenus par les échangeurs. En effet, en dehors de l'habitat individuel autour de 5 $kWh_{ep}/m^2.an$, elle est généralement au-dessus de 15 $kWh_{ep}/m^2.an$ en tertiaire, et près de 15 $kWh_{ep}/m^2.an$ en habitat collectif.

Illustration 51 – Consommation des ventilateurs



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 car 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, ce qui augmente fortement la consommation des ventilateurs par rapport au scénario réglementaire.

5.3.4 Des pratiques à optimiser

Des programmations possibles en tertiaire

La programmation joue un rôle important dans la consommation électrique des ventilateurs. En tertiaire[14], une optimisation des horaires de fonctionnement permet de réduire de façon importante les consommations tout en assurant un renouvellement d'air hygiénique en période d'occupation.

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). »*

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 $kWh_{ep}/an/m^2$. »*

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 consignes différentes entre la mi-saison et l'été.

Des sur-ventilations d'été sous-utilisées et insuffisantes

La sur-ventilation, 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 sur-ventilation 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. »*

14. La réglementation imposant une ventilation générale et permanente en habitat.

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. Une ventilation naturelle par ouverture de baies qui présente des débits plus importants, serait plus performante pour refroidir, 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.

L'efficacité des échangeurs de récupération d'énergie sur air extrait des VMC double flux s'avère très bonne et les dysfonctionnements peu récurrents.

La consommation des ventilations hygroréglables en habitat individuel peut être très faible, inférieure à 3 $kWh_{ep}/m^2.an$. Mais le double flux peut avoisiner les 15 $kW_{ep}/m^2.an$ en habitat collectif, ou le dépasser en tertiaire, ce qui vient réduire l'intérêt des gains thermiques obtenus par les échangeurs.

Assez souvent des filtres très encrassés ont déjà 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 est plus efficace que la VMC et non consommateur d'énergie.

5.4 Auxiliaires

Les mesures montrent que les auxiliaires de chauffage et d'ECS consomment autour de **7 $kWh_{ep}/m^2.an$**. Elle varie de 2 à 22 $kWh_{ep}/m^2.an$, quelle que soit la fonction du bâtiment (cf. illustration 15).

En comparant ces valeurs mesurées à celles de leur valeur dans l'étude thermique réglementaire. Les tendances suivantes ressortent :

- pour l'habitat individuel (échantillon de 5 opérations), **les consommations mesurées sont proches des valeurs de l'étude thermique**, sauf en cas de dérive ou de non-utilisation des pompes ;
- pour l'habitat collectif (6 opérations) et les bâtiments tertiaires (4 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 un calendrier, et donc non asservies sur le chauffage ou la CTA correspondant** (fonctionnement continu en période de chauffe, même quand l'appareil est éteint) ;
- puissance des pompes installées trop élevées :
  - pour la puissance des pompes, les dysfonctionnements sont dus à des écarts entre la puissance prescrite dans le CCTP et la puissance de la pompe installée,
  - cette surpuissance atteint un facteur 5 dans un cas ;
- pompes non paramétrées :
  - **des pompes à débits variables ne sont pas paramétrées, et fonctionnent à débits fixes** (à leur débit maximal) à chaque fois qu'elles sont en marche.

À retenir

Les auxiliaires de chauffage et d'ECS consomment autour de 7 $kWh_{ep}/m^2.an$.

Les trois causes de dérives 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). Par contre, ils le sont systématiquement dans le sud méditerranéen, mais aussi dans l'est (zones H3 et H1b ; cf. illustration 68 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 RT2005[15].

Les équipements de refroidissement rencontrés sont les suivants :

- dans un tiers des cas, il ne s'agit pas à proprement parler de climatisation, mais de rafraîchissement sur nappe ;
- on trouve un groupe froid dans un seul cas, une installation après coup ;
- dans tous les autres cas il s'agit de pompes à chaleur réversibles.

Les mesures font apparaître une consommation autour de **7 kWh$_{ep}$/m².an pour les bureaux**, de 1 à 14 kWh$_{ep}$/m².an (cf. illustration 15).

Trois causes de dérives ont principalement été identifiées :

- un pilotage par l'occupant non maîtrisé ;

  Pour un habitat :

  > *« 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

Le rafraîchissement des bureaux consomme autour de 7 kWh$_{ep}$/m².an.

Les trois principales causes de dérives des consommations sont :

- un pilotage par l'occupant non maîtrisé ;
- un groupe froid non asservi au fonctionnement de l'émission ;
- une climatisation encore active en hiver.

15. La RT2005 distingue deux catégories de locaux relativement au confort d'été et au refroidissement : les locaux, dits de catégorie CE1, pour lesquels les consommations de référence liées au refroidissement sont nulles et qui doivent respecter l'exigence sur la température intérieure de confort, et les autres locaux, dits de catégorie CE2, nécessitant d'être climatisés sous conditions (exposition au bruit…) pour lesquelles les consommations de référence liées au refroidissement sont calculées, mais ne sont pas soumises aux exigences de confort d'été.

5.6 Éclairage

Nous nous intéressons ici à l'installation d'éclairage naturel et artificiel 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).

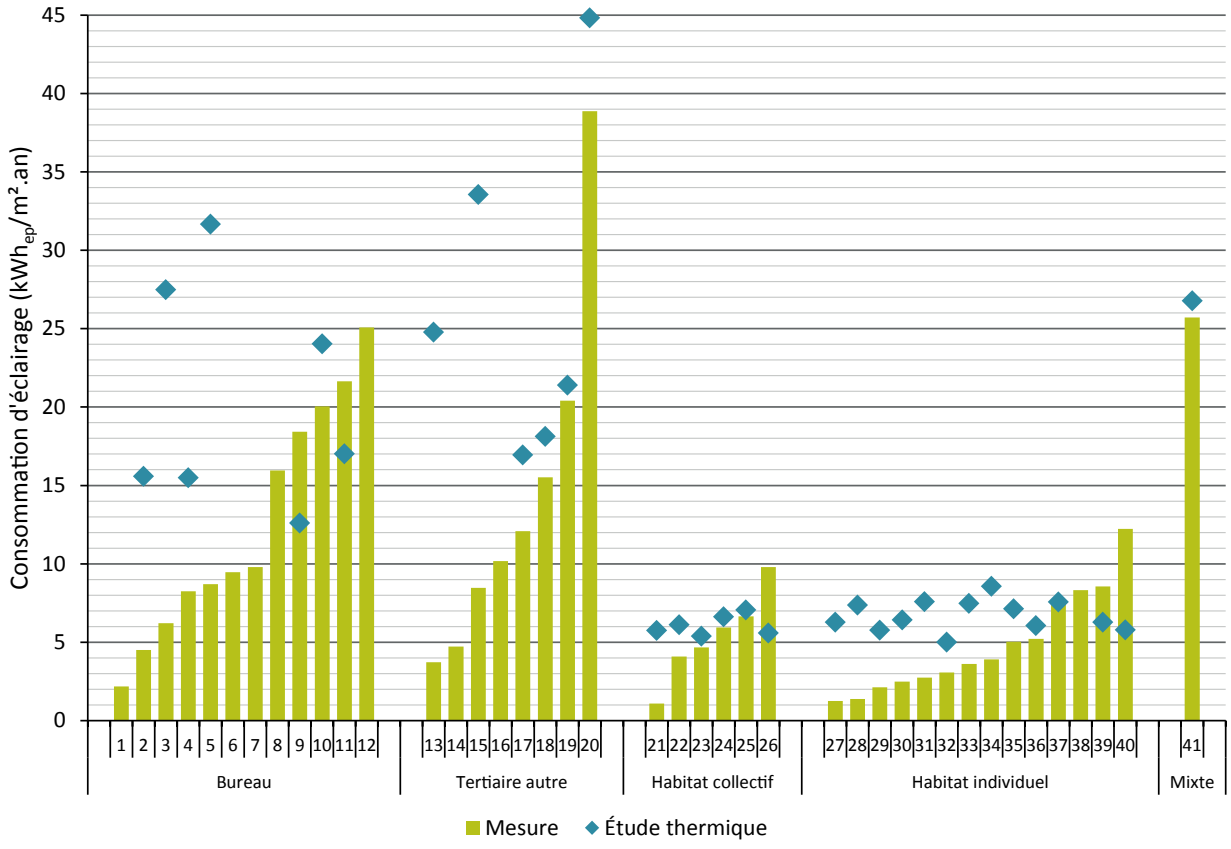
L'éclairage d'appoint ne peut encore être valablement analysé compte tenu des informations disponibles sur l'échantillon d'opérations.

L'éclairage des ascenseurs et l'éclairage de sécurité sont traités aux § 5.7.1 et 5.7.2.

5.6.1 Des consommations très variables

L'histogramme suivant donne les consommations mesurées par fonction des bâtiments (champ réglementé). N'y figurent pas les opérations d'habitation pour lesquelles nous ne disposons que de la consommation des parties communes, c'est-à-dire sans la consommation à l'intérieur des logements (parties non instrumentées).

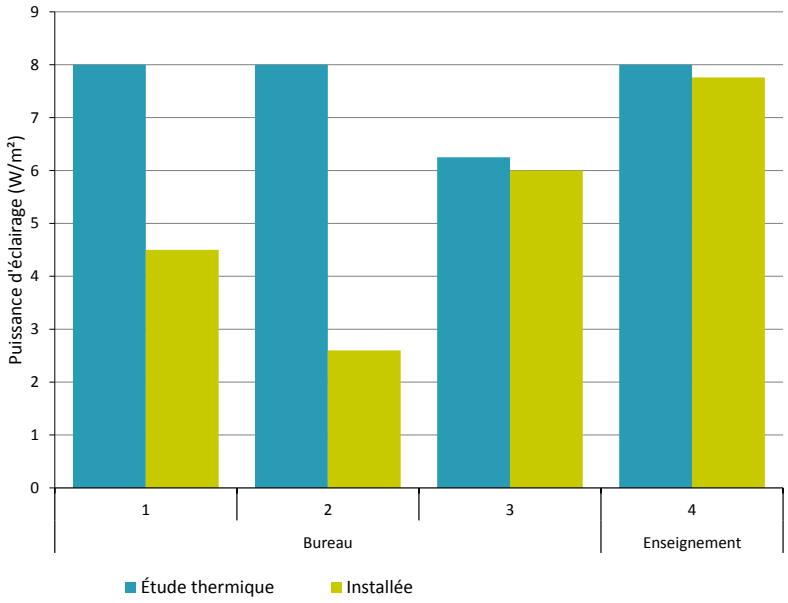
Illustration 52 – Consommation d'éclairage mesurée et sa valeur de l'étude thermique réglementaire



Quelle que soit la fonction du bâtiment, les consommations sont très variables. C'est d'ailleurs pourquoi, en habitat, la puissance surfacique est fixée à une valeur commune de 2 W/m² dans la méthode de calcul Th-CE 2005, la consommation réelle n'étant pas dépendante de la performance du bâtiment livré mais du choix des luminaires par les occupants, au-delà des durées d'utilisation ou de fonctionnement. Cette valeur se retrouve dans le graphique, aux différences près de scénarios d'occupation et de surface, avec une valeur de l'étude thermique réglementaire stable de l'ordre de 7 $kWh_{ep}/m^2.an$. Les valeurs mesurées sont réparties autour, mais davantage en dessous, ce qui peut s'expliquer en partie par la non comptabilisation ici des consommations des luminaires branchés aux prises électriques.

La consommation annuelle mesurée des bâtiments tertiaires est de l'ordre du double de celle de l'habitat (environ 10 contre 5 $kWh_{ep}/m^2.an$). Même si la technologie choisie est généralement la même dans les bâtiments tertiaires (la fluorescence) la variabilité de leur consommation est également bien plus importante qu'en habitat, y compris au niveau de leur valeur de l'étude thermique réglementaire. Par contre, contrairement à l'habitat, les valeurs mesurées sont plus systématiquement en dessous de ces dernières. Ceci s'explique en partie par le fait que les puissances installées en éclairage général peuvent être bien inférieures à celles prises en compte dans l'étude thermique, comme le montrent les mesures sur deux opérations dans l'histogramme suivant.

Illustration 53 – Puissance d'éclairage



Les puissances d'éclairage maximales appelées peuvent également être nettement inférieures aux puissances installées du fait de l'occupation partielle (en effectif ou en durée de présence).

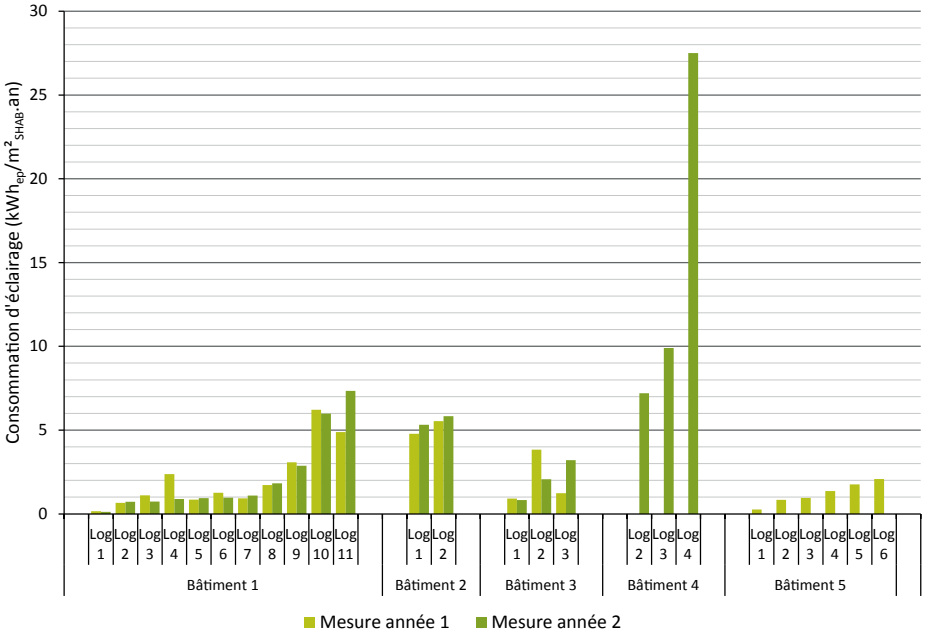
Dans ces différents cas, les consommations de chauffage ou de climatisation pour les bâtiments concernés, en sont alors impactées. En effet, la puissance d'éclairage diminuant, les apports de chaleur de celle-ci diminuent également, entraînant alors une augmentation des besoins de chauffage en hiver ou une diminution des besoins de froid en été.

L'utilisation d'éclairages d'appoint localisés (lampes de bureaux) peut également expliquer des écarts sur la puissance installée.

5.6.2 De faibles consommations dans les logements

La consommation de l'éclairage général des logements peut également fortement varier. Un cas d'appartement éclairé quasiment en permanence a montré une consommation de 63 $kWh_{ep}/m^2_{SHAB}.an$. Malgré tout, elle est généralement assez faible, entre 1 et 10 $kWh_{ep}/m^2_{SHAB}.an$, aux éclairages d'appoint près (lampes de chevet ou de table, éclairage d'ambiance...). Dans plus de la moitié des cas, cette consommation est inférieure à 1 $kWh_{ep}/m^2_{SHAB}.an$.

Illustration 54 – Consommation d'éclairage mesurée dans les logements



5.6.3. Des systèmes de gestion pas toujours maîtrisés

En ce qui concerne la gestion de l'éclairage artificiel, le détecteur de présence est souvent mis en place en association avec un interrupteur et/ou un gradateur et/ou parfois une horloge selon l'usage des locaux et de la zone.

Pour un immeuble de bureaux en Rhône-Alpes :

> *« L'utilisation d'interrupteurs simple allumage dans les circulations conduit à ce que l'éclairage reste allumé, ce qui entraîne des gaspillages conséquents. »*

Toutefois, les réglages des détecteurs sont souvent mal effectués, quand ils ne sont pas tout simplement oubliés, voire pas réalisés. Ces réglages portent sur la temporisation d'extinction et le seuil lumineux de déclenchement et d'extinction. Comme pour d'autres systèmes, le premier réglage n'est pas toujours effectué à la livraison du bâtiment. Il en est de même pour celui qui, lors de la première année de fonctionnement, devrait affiner le premier.

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'éclairement du local, les gains liés aux apports d'éclairage naturel sont nuls et seule la fonction de détection de présence reste bénéfique.*
>
> *La temporisation des détecteurs de présence est très différente d'un détecteur à l'autre, de 1 à 10 minutes.*
>
> *Si le détecteur est bien positionné et permet de couvrir l'ensemble du local, la temporisation la plus courte possible, donne de meilleurs résultats. »*

L'automatisation du déclenchement de l'éclairage artificiel 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.

Enfin, le matériel choisi pour la régulation ne répond pas toujours aux besoins de la zone concernée, notamment par non prise en compte des aspects suivants :

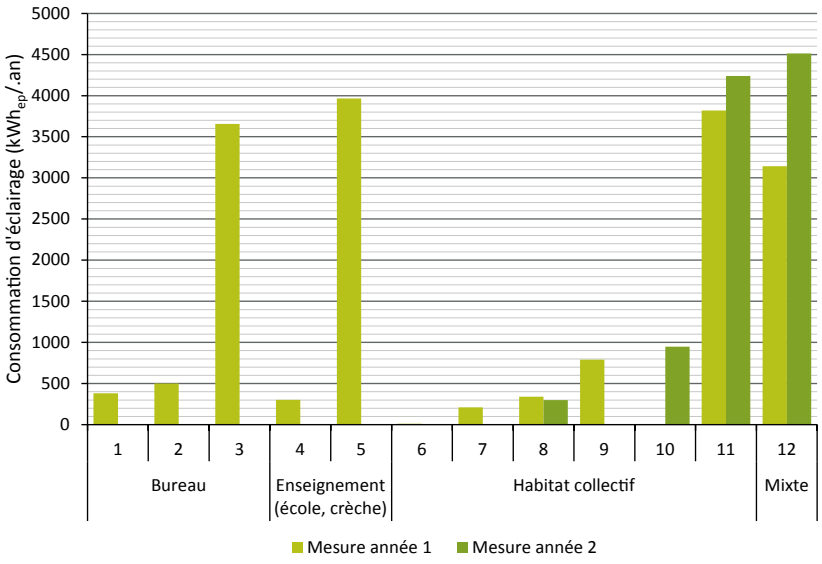
- zonage des espaces en fonction des apports d'éclairage naturel, en particulier pour les circulations ;
- qualité de la détection (positionnement du détecteur, distance de détection, sensibilité aux mouvements, temporisation à l'extinction compatible avec l'activité) ;
- facilité de mise en œuvre des réglages (durée des temporisations, seuil crépusculaire...) ;
- consommations électriques des auxiliaires d'éclairage (veille des détecteurs, télécommande...) ;
- facilité d'accès pour l'entretien et la maintenance compatible avec la durée de vie des équipements.

5.6.4 Des éclairages extérieurs parfois trop consommateurs

Douze espaces extérieurs ont été suivis. Leur mesure de consommation figure dans l'histogramme suivant.

Dans trois quarts des cas, la consommation est inférieure à 1 000 kWh_{ep}/an, l'allumage s'effectuant par détecteur crépusculaire et son extinction, autour de 1 h du matin, par horloge.

Illustration 55 – Consommation d'éclairage des espaces extérieurs



Mais dans un quart des cas, la consommation de l'éclairage extérieur est de l'ordre de huit fois supérieure et représente au moins 20 % de la consommation totale d'éclairage. Pour un habitat collectif, elle s'élève même à 60 %. De nombreux déclenchements intempestifs dus à un champ de détection mal réglé en sont généralement à l'origine.

À retenir

Les consommations d'éclairage sont très variables et dépendantes de l'usage, notamment de par les durées de fonctionnement induites.

Dans le champ réglementé, le niveau de consommation se situe autour de 5 kWh_{ep}/m^2.an en habitat et de 10 kWh_{ep}/m^2.an dans les bâtiments tertiaires. Dans plus de la moitié des logements instrumentés, il est inférieur à 1 kWh_{ep}/m^2_{SHAB}.an.

En tertiaire et dans les parties communes en habitat, le système de gestion de l'éclairage n'est pas toujours choisi en fonction des besoins des locaux et de leurs occupants et n'est pas toujours réglé afin d'optimiser son fonctionnement.

5.7 Autres équipements immobiliers

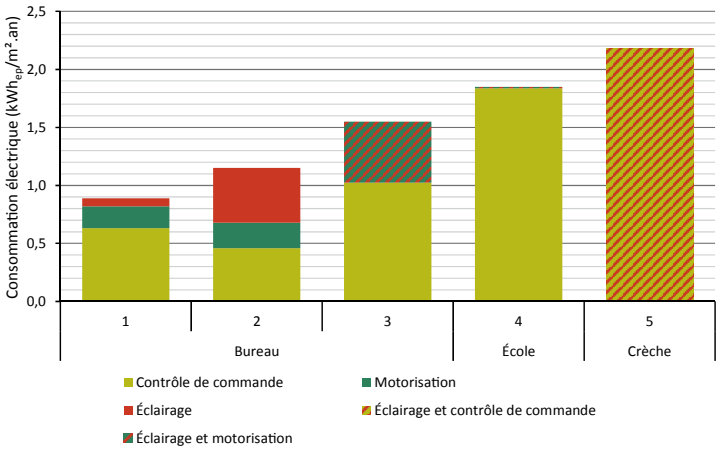
Nous nous intéressons ici aux performances énergétiques des autres équipements immobiliers (ascenseurs, équipements de sécurité incendie, portes automatiques...), dont la consommation n'est pas soumise à la réglementation thermique.

5.7.1 Ascenseurs

La mise en place d'un ascenseur n'est pas systématique. Sur les 20 bâtiments tertiaires de l'échantillon ayant au moins un étage, 9 opérations n'ont pas d'ascenseurs. Sur les 11 opérations de logements collectifs, 4 en sont également dépourvues.

Dans les bâtiments tertiaires, les mesures montrent des consommations de 1 à 2 $kWh_{ep}/m^2_{SHON}.an$, avec une grande disparité, par poste (contrôle de commande, éclairage de la cabine et motorisation), mais aussi en puissance de veille.

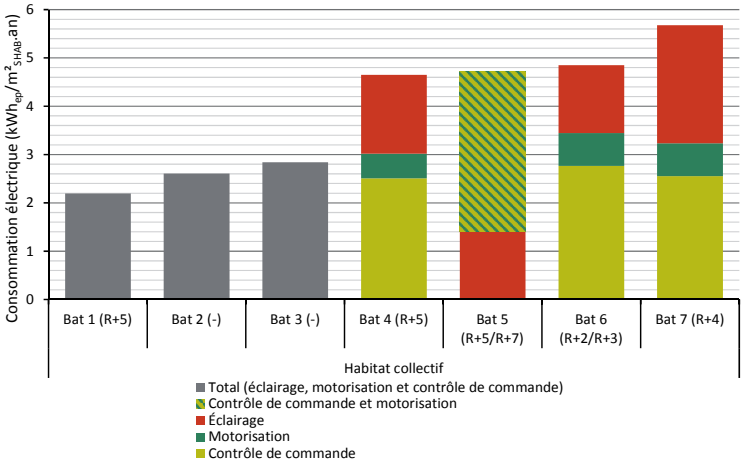
Illustration 56 – Consommation des ascenseurs répartie par poste en tertiaire



Les deux ascenseurs qui ont la plus grosse consommation au m², dans l'école et la crèche, ne sont en fait jamais utilisés (fonctionnement avec une clé), mais ont une puissance de veille importante.

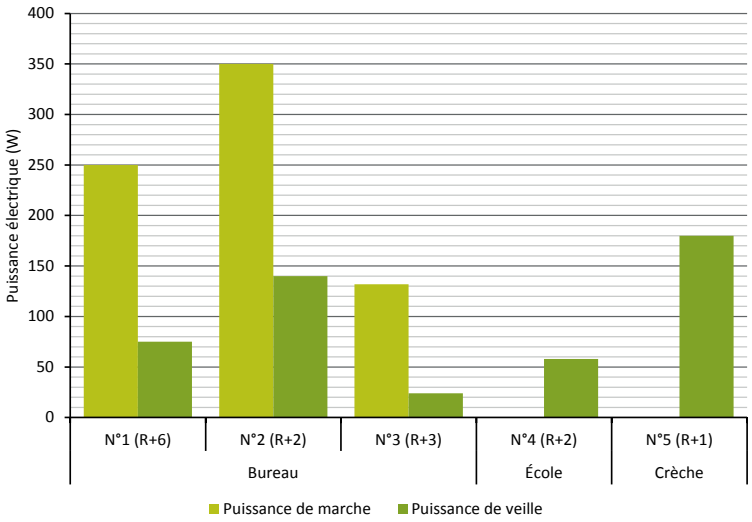
En habitat collectif, la consommation des ascenseurs varie entre 2 et 6 $kWh_{ep}/m^2_{SHAB}.an$.

Illustration 57 – Consommation des ascenseurs répartie par poste en habitat collectif



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.

Illustration 58 – Puissance de veille et de fonctionnement des ascenseurs



Les puissances de veille ont une amplitude importante, comprises entre 25 et 180 W. Elles sont prépondérantes, notamment à cause d'un panneau de contrôle très consommateur (allant jusqu'à 215 W sur une opération), et de la gestion de l'éclairage.

Sur les 11 ascenseurs suivis :

- 5 ont un éclairage permanent ;
- 4 ont une mauvaise temporisation de l'éclairage (supérieure à 30 minutes) ;
- seulement 2 ont une gestion correcte de l'éclairage de la cabine.

À retenir

La consommation des ascenseurs varie de :

- 1 à 2 kWh_{ep}/m^2_{SHON}.an dans les bâtiments de bureaux ;
- 2 à 6 kWh_{ep}/m^2_{SHAB}.an en habitat collectif.

Elle varie surtout en fonction :

- de la puissance de veille ;
- de l'éclairage de la cabine (parfois permanent) ;
- et du contrôle commande de la cabine.

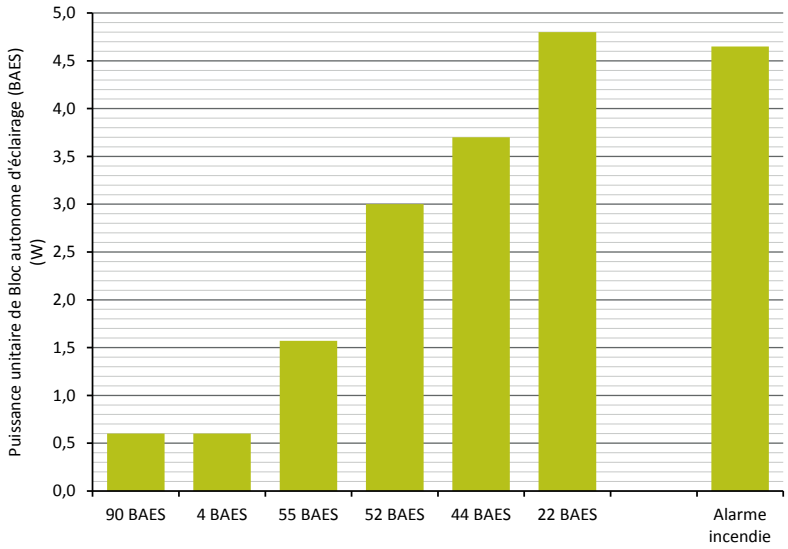
La part de la motorisation est minime (pour des immeubles limités à 7 étages).

5.7.2 Sécurité incendie

Des données sur les blocs autonomes d'éclairage de sécurité (BAES) sont disponibles pour 6 opérations, 3 bureaux, 2 écoles et 1 crèche.

Le graphique ci-dessous donne les différentes puissances de fonctionnement dans quatre de ces opérations. Chaque puissance donnée est unitaire. Tous ces équipements ont un fonctionnement permanent sur l'année.

Illustration 59 – 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.

Ramenée à la surface de l'opération, une mesure a montré une consommation des BAES supérieure à 3 kWh_{ep}/m^2_{SHON}.an.

Les consommations de la sécurité incendie liées à l'alarme incendie sont bien plus faibles. Sur la seule opération où l'alarme incendie est suivie, sa puissance de veille est de 4,65 W.

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).

5.7.3 Interphones, portes automatiques et sèche-mains

Des suivis ponctuels ont été réalisés sur d'autres équipements immobiliers :

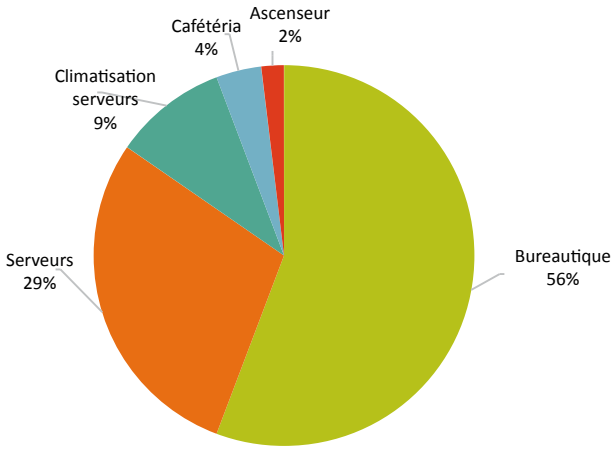
- le groupe « interphone + gâche » a une puissance de veille supérieure à 40 W ;
- les portes automatiques ont chacune une puissance de veille comprise entre 20 et 40 W ;
- certains sèche-mains ont une puissance de marche de 300 W, causant jusqu'à 0,8 kWh_{ep}/m^2.an de consommation sur une opération.

5.8 Équipements mobiliers

Nous nous intéressons ici aux performances énergétiques des équipements mobiliers (bureautique, audiovisuel, électroménager...), dont les consommations ne sont pas soumises à la réglementation thermique.

Dans les bâtiments tertiaires de bureaux, les consommations d'électricité proviennent essentiellement de la bureautique et ses serveurs. Cette part peut s'élever à 95 % de la consommation d'électricité spécifique (c'est-à-dire non réglementée), comme le montre le cas d'un immeuble de bureau détaillé à travers le graphique suivant.

Illustration 60 – Répartition des consommations d'électricité spécifique dans un immeuble de bureau

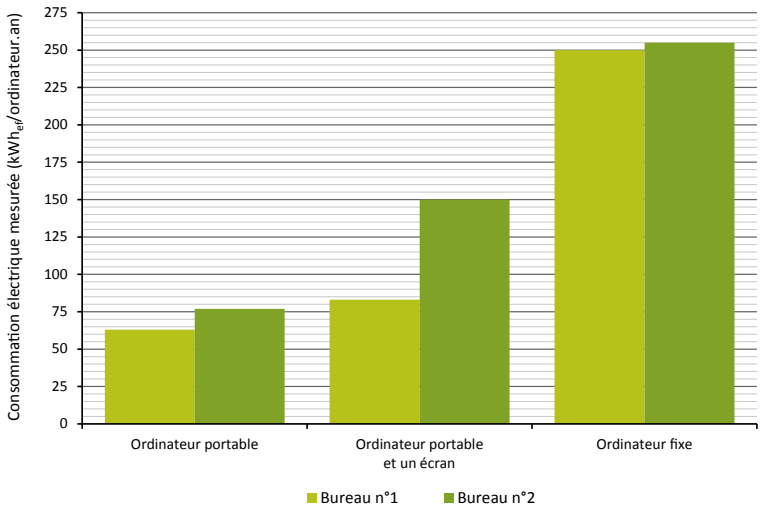


Dans ce chapitre, les consommations pourront être exprimées en énergie finale (kWh_{ef}), en plus de celles qui resteront en énergie primaire (kWh_{ep}).

5.8.1 Ordinateurs

Sur deux opérations, une centaine d'ordinateurs ont été spécifiquement instrumentés et suivis, avec des résultats identiques.

Illustration 61 : Consommation de trois configurations d'ordinateur en moyenne par opération[16]



La consommation des ordinateurs fixes est très élevée par rapport à celle des ordinateurs portables. Cette différence s'explique par :

- la différence de puissance de fonctionnement ;
- une durée de fonctionnement plus courte pour les ordinateurs portables (mise en veille plus systématique) ;
- la différence de puissance de veille ;
- l'absence d'onduleur sur les ordinateurs portables (l'onduleur a un rendement de fonctionnement, d'où des pertes).

À retenir

En moyenne, un ordinateur portable a une consommation de 70 à kWh_{ef}/an, quatre à cinq fois moindre qu'un ordinateur fixe (250 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. »*

5.8.2 Serveurs bureautiques

Sur toutes les opérations suivies spécifiquement, les serveurs ont un fonctionnement permanent, ils ne sont jamais coupés. Cela est également le cas pour ceux ne pouvant pas être utilisés depuis l'extérieur, et donc en dehors des heures d'ouverture.

16. Les ordinateurs portables connectés à un écran de bureau sont en nombre plus réduits dans les deux opérations, d'où des consommations moyennes moins homogènes.

Mutualisation des serveurs ?

Pour les bureaux, les puissances installées vont de 1,3 W/m² à 4 W/m² (surface utile). Ces écarts ne sont pas liés à l'activité mais à la mutualisation des moyens ou non entre les différents plateaux.

Les bâtiments ayant les consommations liées aux serveurs les plus élevées sont ceux où chaque entité a son propre serveur.

Puissance installée et consommation des serveurs

	Équipements	Puissance	Puissance/m²$_{SU}$	Consommation hors climatisation [kWh$_{ep}$/m²$_{SU}$.an]
Bureau 1	1 serveur (1 plateau suivi)	348 W	4,0	35,2
Bureau 2	1 serveur + climatisation spécifique	2 400 W + clim	2,2	19,1
Bureau 3	1 ordinateur + 1 baie Voix-Données-Images (VDI)	200 W + 300 W	1,3	11,1
Bureau 4	12 serveurs	9 610 W	4,3	37,8
École	1 baie de brassage	18 W	0,1	0,9
Crèche	1 serveur informatique + 1 serveur téléphonique	259 W	0,4	3,5

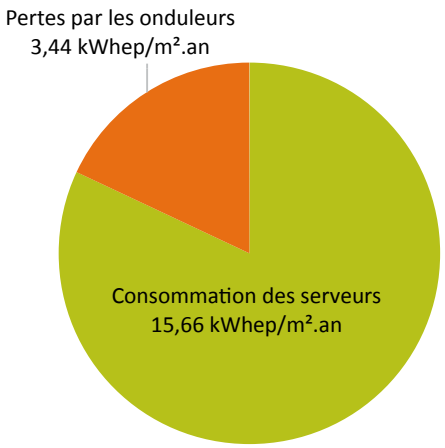
Dimensionnement de l'onduleur

Les serveurs sont toujours branchés sur un onduleur permettant l'alimentation en électricité en cas de coupure de courant. L'onduleur a des pertes conséquentes, sur toutes les opérations où il a été suivi.

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 62 – Dimensionnement de l'onduleur



Climatisation de la salle serveur

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 : il a été fait le choix de ne pas climatiser le local 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.

À retenir

Les organisations qui mettent en commun les salles serveur peuvent diviser par 3 leur consommation (puissance installée de 1,3 W/m² au lieu de 4 W/m²).

La consommation des salles serveur est très élevée à cause :

- d'une puissance de fonctionnement élevée ;
- d'un fonctionnement permanent ;
- d'une climatisation dédiée maintenant le local à basse température ;
- des pertes de l'onduleur.

5.8.3 Autres équipements bureautiques

Sur certaines opérations, un suivi a été effectué directement sur les appareils. Les photocopieurs et imprimantes ont une consommation de veille comprise entre 15 W (imprimante) et 50 W (photocopieur). Cependant, cette mise en veille n'est pas automatique. Des photocopieurs et imprimantes fonctionnent toute l'année, consommant en moyenne plus de 2 000 kWh_{ef}/machine.an.

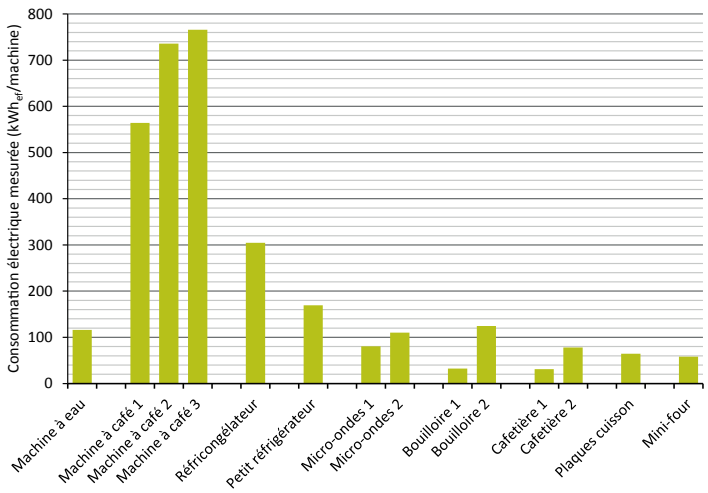
Puissances de veille de quelques appareils de bureau

Appareil	Vidéo projecteur	Chaîne hi-fi	Imprimante	Photocopieur
Puissance de veille	5 W	1 W	15 W	50 W

5.8.4 Autres équipements mobiliers

Sur certaines opérations, d'autres appareils ont été instrumentés et suivis. L'illustration 63 en rapporte les consommations mesurées, en énergie finale.

Illustration 63 – Consommation mesurée des appareils mobiliers (en énergie finale)



Les machines à café, qui fonctionnent en permanence sur l'année, ont une consommation comprise entre 600 et 800 kWh_{ef}/an. Leur puissance de veille est de 60 à 80 W. Les arrêter en période d'inoccupation permet une économie de 70 %.

Viennent ensuite les réfrigérateurs et congélateurs, fonctionnant également toute l'année, avec une consommation entre 200 et 300 kWh_{ef}/an, et une puissance de veille de 20 à 35 W.

Les machines à eau, ayant également un fonctionnement permanent (rafraîchissement de l'eau), sont quant à elles, plus économes, avec une puissance de veille de 10 W.

À retenir

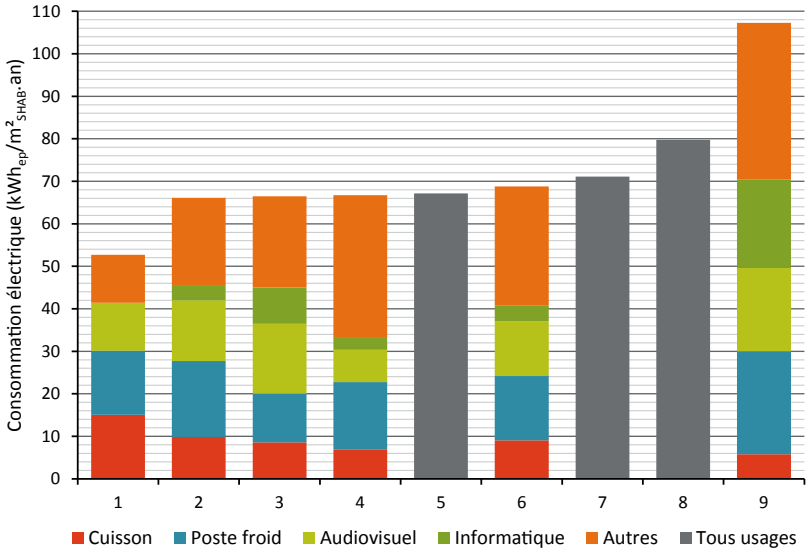
Une machine à café a une consommation de l'ordre de 700 kWh_{ef}/an, similaire à 3 ordinateurs fixes ou 12 ordinateurs portables.

Un réfrigérateur a une consommation annuelle équivalente à un ordinateur fixe.

5.8.5 Postes de consommation en logement

La consommation moyenne d'électricité hors usages réglementés a pu être établie par immeuble à partir des mesures réalisées dans 11 logements instrumentés répartis sur 9 opérations. Cinq postes de consommation ont généralement pu être distingués : cuisson, froid, audiovisuel, informatique et autres.

Illustration 64 - Répartition de la consommation mobilière des logements en moyenne par opération



La consommation des équipements mobiliers des logements est globalement assez stable, à 69 kWh_{ep}/m^2_{SHAB}.an, mais variable par poste.

Le poste « froid alimentaire » (réfrigérateur, congélateur) est généralement le plus consommateur (entre 18 % et 28 %). S'en suit le poste « audiovisuel » entre 11 % et 24 %.

Pour un habitat collectif :

> *« Des prises commandées ont été mises à disposition des occupants. Elles ont permis de réaliser des économies sur la consommation de veille des équipements dans certains logements. Les occupants se sont majoritairement appropriés cet outil (12 ménages sur 21). »*

Hors froid alimentaire, la puissance de veille des équipements électriques des logements suivis varie de 0 à 100 W par logement.

© Cerema

6

Performances d'ensemble du bâtiment

L'essentiel

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 17 bâtiments il apparaît que les performances attendues à la conception ne sont pas atteintes, mais que néanmoins les consommations observées se situent bien en deçà de ceux de la génération précédente construite suivant la RT 2005.

6.1 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, comme les parties précédentes l'ont esquissé, 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 : comme il l'a été montré dans les chapitres 2 et 3, les conditions météorologiques peuvent faire varier la consommation donnée par le calcul de l'étude thermique jusqu'à 15 kWh_{ep}/m^2.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 (cf. Méthode § 4). La consommation mesurée peut alors être comparée à cet indicateur que nous appellerons « consommation attendue ».

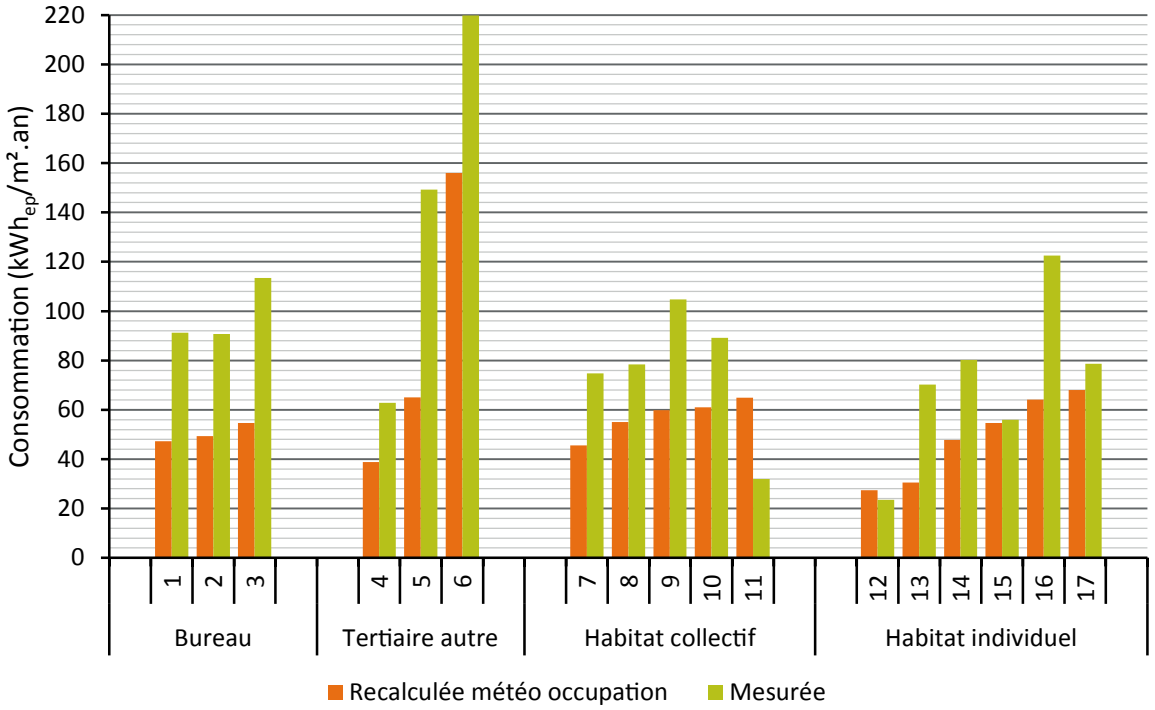
Cette démarche développée dans les suivis-évaluations du Cerema est rendue possible, notamment, par :

- 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...).

Le recalcul des consommations a pu être réalisé sur 17 opérations, laissant apparaître que la consommation mesurée lors des premières années de fonctionnement du bâtiment est quasi systématiquement au-delà de la consommation attendue, dans une fourchette de 20 à 40 kWh_{ep}/m^2.an pour la moitié des bâtiments et de l'ordre de 60 kWh_{ep}/m^2.an pour un quart d'entre eux.

Illustration 65 – Consommation attendue et consommation mesurée des postes réglementés



Pour l'habitat, ces consommations restent néanmoins bien inférieures aux consommations observées pour les logements RT 2005 en 2011 (de l'ordre de 120 $kWh_{ep}/m^2.an$ en chauffage au gaz et 170 $kWh_{ep}/m^2.an$ en chauffage électrique).

6.2 Explication des écarts constatés

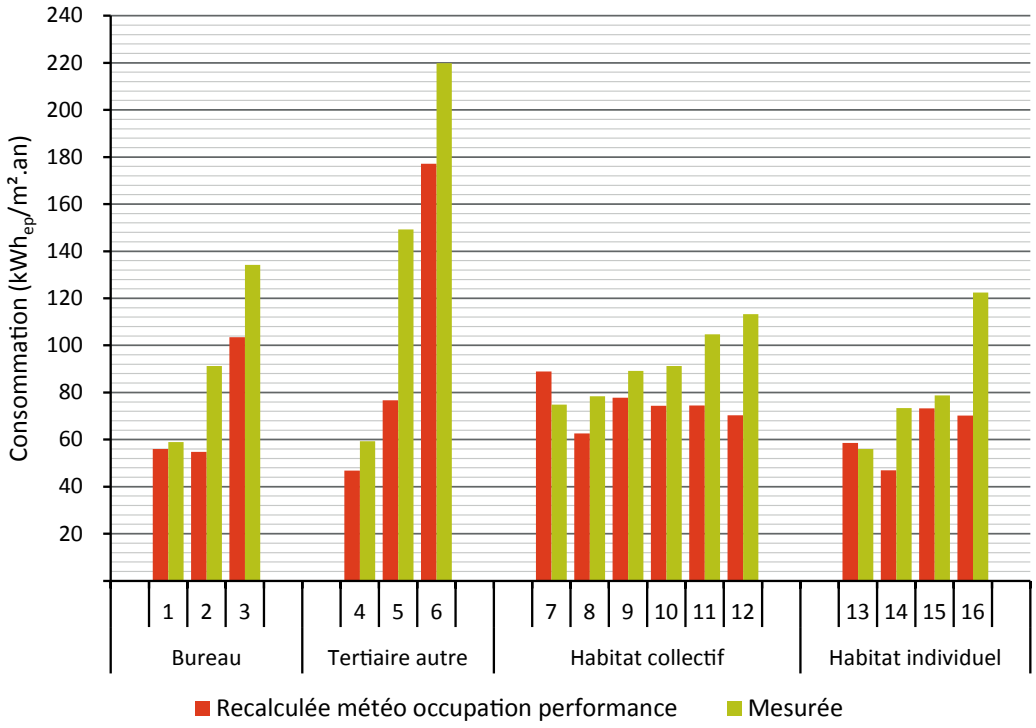
Afin d'expliquer ces écarts entre consommations attendues et consommations mesurées, la démarche adoptée dans les suivis-évaluations du Cerema cherche à caractériser *in situ*, par des méthodes d'évaluation basées sur des mesures, les performances intrinsèques des bâtiments sur tout ou partie des éléments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

- étanchéité à l'air de l'enveloppe ;
- $U_{bât}$ par la méthode du bilan thermique équilibré sur les semaines les plus froides (cf. 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).

Cependant 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 mesures et de recueil d'information auprès des occupants.

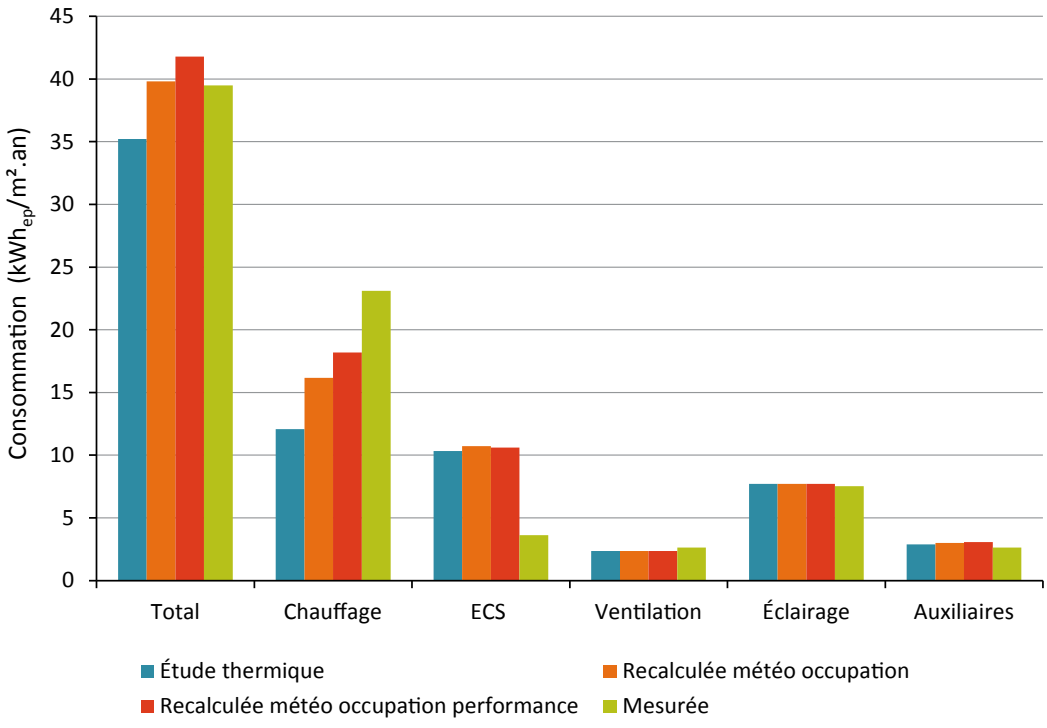
Illustration 66 – Consommation attendue recalculée avec tous les paramètres de performance constatés et consommation mesurée (postes réglementés)



Sur l'échantillon, une grande partie des écarts bruts constatés entre la consommation attendue à la conception (valeur de l'étude thermique réglementaire dans les conditions météorologiques et d'occupation de l'année des mesures) et la valeur mesurée peuvent être expliqués par les écarts de performance intrinsèques mesurés.

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

Illustration 67 – Bilan des consommations sur une maison individuelle



À la lumière de ces résultats et des analyses conduites dans les chapitres précédents, il apparaît, à ce stade du travail de capitalisation, que les écarts entre performances attendues et mesurées seraient 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.

Les méthodes de suivis-évaluations 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 de ce qui relève de la gestion thermique de la demande qui est du ressort des occupants et leur comportement éco-responsable.

© Arnaud Bouissou/MEDDE-MLETR

7

Pratiques des acteurs

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'ordre humain et social, qui permettent de comprendre et d'analyser cette performance. Certains d'entre eux méritent d'y accorder 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 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 se répercute directement sur la performance énergétique, notamment en cas de difficulté pour mobiliser les compétences, comme actuellement.

Les bâtiments sont conçus pour accueillir des personnes avec leurs activités professionnelles ou domestiques, ce sont donc d'abord des lieux de vie et/ou de travail. La manière dont ces occupants s'approprient les différentes caractéristiques d'un bâtiment à basse consommation constitue également 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 celui-ci 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.

7.1 Acteurs de la construction-rénovation

Avant d'aborder l'organisation et les pratiques des professionnels, intéressons-nous 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

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'exigences 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 éprouvés 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

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.

Organisation et pratiques des professionnels du bâtiment : des compétences parfois difficiles à mobiliser

Les suivis des chantiers ont mis en évidence des exemples récurrents 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'erreur 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'exigences 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'entreprise 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.

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.

Le **manque de recul et de retours d'expérience** sur ces matériaux et technologies nouvelles, 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'étude 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 (cf. § 8.1) sont également récurrents.

7.2 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.

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 amenant à les contrarier** (cf. § 8.1).

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.

Les pratiques des utilisateurs susceptibles d'entraver la performance énergétique proviennent généralement :

- 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 pilotage et d'entretien ne sont pas suffisamment anticipés dans les projets.

En outre, les problèmes de pilotage et d'entretien peuvent conduire à des dysfonctionnements importants ainsi qu'à un inconfort ressenti par les occupants.

© Arnaud Bouissou/MEDDE-MLETR

8

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 l'unique mode de perception 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 la qualité des équipements de chauffage.

Par contre l'appréciation du confort estivale est, elle, 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'heure à plus de 28 °C. Les résultats obtenus apparaissent d'avantage en phase avec le ressenti des occupants.

Enfin, des niveaux de température très élevés peuvent être constatés en mi-saison dans certains bâtiments.

8.1 Satisfaction des occupants et confort perçu

La notion de confort constitue, dans la plupart des cas, l'unique mode de perception 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 : choix de la température de consigne, 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 (possibilité de faire des boissons chaudes en hiver ou d'accéder à de l'eau fraîche en été par exemple, vêtements adaptés à la température...), la possibilité de pouvoir 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.

Ainsi, on observe des **inconforts thermiques ressentis en hiver et en été** 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 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 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, notamment lorsqu'il s'agit des conditions sanitaires (absence de développements microbiens) ;
- à 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...

Au-delà de la méconnaissance des enjeux du niveau de température de consigne, la régulation thermique en hiver comme en été nécessite des compétences très inégalement partagées. Les **habitudes socio-culturelles** peuvent avoir un impact positif ou négatif sur les consommations et le niveau de confort. En effet, les pratiques inadaptées observées sur certaines opérations peuvent être imputées à une absence de compétences et/ou à des habitudes culturelles contre productives. C'est par exemple ce qui peut expliquer les situations d'inconfort d'été observées dans la partie nord de la France (cf. § 8.3.5). En effet, les régions au nord de la Loire sont plutôt enclines à profiter de la lumière d'été et peu habituées à gérer les températures estivales autrement qu'en ventilant largement en journée. Les habitants n'ont pas, comme les régions du sud, historiquement développé des stratégies pertinentes pour lutter contre les températures élevées ;

- à une **difficulté technique à anticiper et gérer les apports de chaleur internes réels**, en résidentiel comme en tertiaire (cf. § 3.2) ;
- à 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.

8.2 Confort thermique d'hiver

Globalement, les enquêtes réalisées auprès des occupants dans les bâtiments suivis montrent que, sur le plan physiologique, le confort thermique en hiver est jugé globalement satisfaisant du fait des performances thermiques des parois opaques ou des parois vitrées qui ne présentent pas de rayonnement froid. Dans les opérations évaluées, les équipements de chauffage assurent des ambiances confortables en hiver.

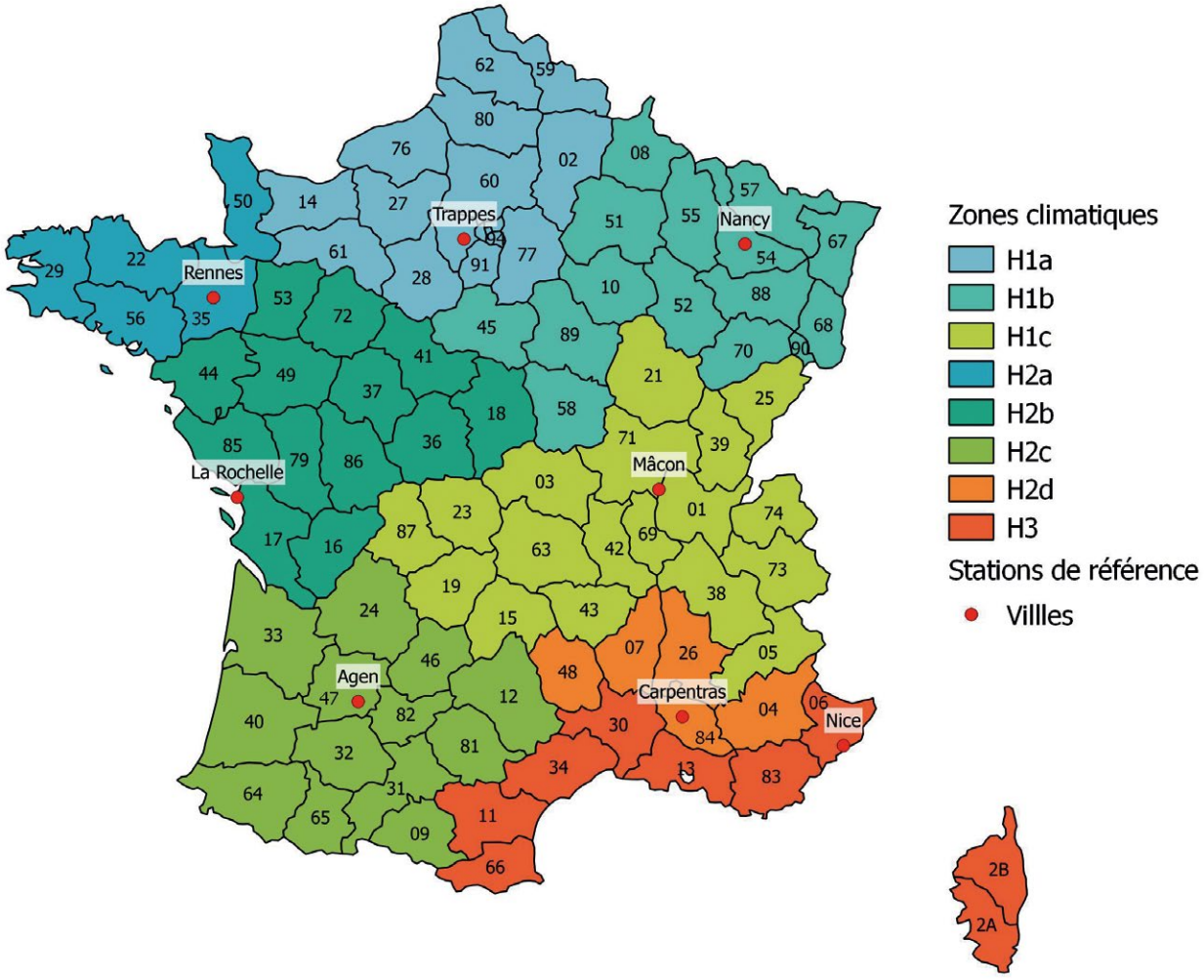
La situation n'est toutefois pas la même pour le confort thermique d'été et de mi-saison, d'où des analyses plus approfondies.

8.3 Confort thermique d'été

Il est à noter en préalable que les zones climatiques d'été sont caractérisées ici par les lettres « a » à « d » (nomenclature issue de la RT 2000) :

	Zone a		Zone b		Zone c		Zone d	
Zones climatiques	H1a	H2a	H1b	H2b	H1c	H2c	H2d	H3
Stations de référence	Trappes	Rennes	Nancy	La Rochelle	Mâcon	Agen	Carpentras	Nice

Illustration 68 – Zones climatiques d'été



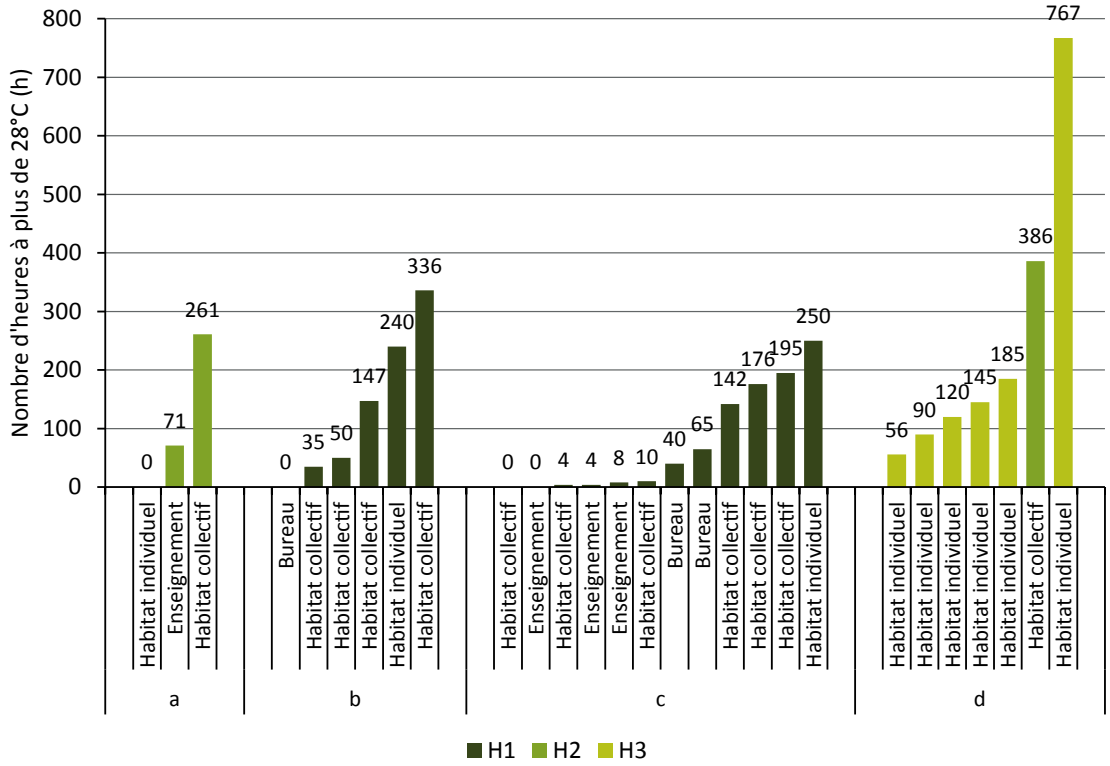
À cela s'ajoute l'effet de l'altitude qui conduit quatre opérations de l'échantillon en zone c à être considérées dans nos analyses comme équivalentes à la zone b ainsi qu'une opération de la zone d en zone c.

Dans les bâtiments à basse consommation, le confort d'été demande une attention particulière, de par leur forte isolation thermique. En effet, celle-ci permet de plus retenir 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.

8.3.1 Le niveau de confort en saison chaude des bâtiments non climatisés varie d'excellent à passable

La plupart des bâtiments non climatisés (19/28) ont moins de 200 heures d'inconfort thermique en température moyenne au regard du seuil de 28 °C, ce qui correspond à une exposition réduite à l'inconfort thermique (2 % de l'année). Un seul bâtiment fait figure d'exception avec un inconfort thermique très marqué à plus de 750 heures par an : il s'agit de logements individuels en bande en zone méditerranéenne (zone d) munis d'une fenêtre de toit donnant sur le vide de la cage d'escalier. La défaillance de la télécommande a conduit à ne pas utiliser la protection solaire motorisée. Mis à part ce cas particulier, les maisons individuelles isolées situées en zone d présentent de bons résultats. **La forte isolation des parois opaques des bâtiments à basse consommation induit en effet une réduction des apports solaires supérieure à l'effet de confinement des apports solaires et internes.**

Illustration 69 – Nombre d'heures supérieures à 28 °C



On trouve cependant des bâtiments à plus de 200 heures d'inconfort dans des zones climatiques plus clémentes (une maison individuelle en zone c en altitude, une maison individuelle en bande en zone b, un habitat collectif en zone b), ce qui montre que la problématique de l'inconfort thermique en saison chaude n'est pas spécifique à la zone méditerranéenne.

Cependant aucune des opérations évaluées n'est exposée au bruit, ce qui a permis aux occupants d'éviter le confinement des apports solaires et internes en ouvrant librement les baies la nuit.

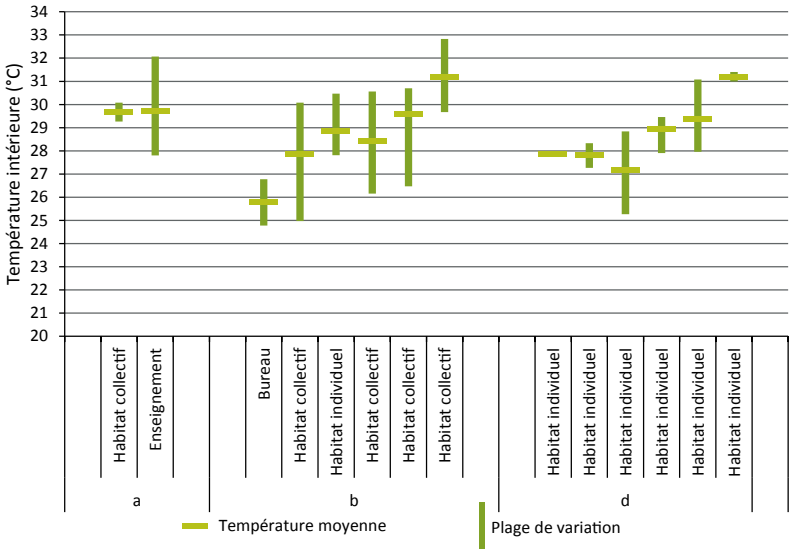
À retenir

La problématique du confort en saison chaude des logements à basse consommation n'est pas spécifique à la zone méditerranéenne. La forte isolation de ces bâtiments n'est pas nuisible en soi au confort d'été : certes elle contribue à diminuer l'évacuation de la chaleur accumulée mais elle réduit également les apports solaires au travers des parois opaques ; son impact dépend donc d'autres facteurs tels que la gestion des ouvertures, et ce quelle que soit la zone climatique.

8.3.2 Le niveau de confort varie au sein d'un même bâtiment selon les modes d'occupation

Le niveau de température intérieure varie d'un local à l'autre. Au sein d'un même bâtiment collectif d'habitation on constate des écarts de plus de quatre degrés entre les logements.

Illustration 70 – Température maximale journalière les jours les plus chauds



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 locaux orientés au nord ou nord-est peuvent être plus chauds qu'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 ceux en dehors des zones méridionales, sur les bonnes pratiques de gestion thermique d'été.

Il est cependant délicat de vouloir 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 de ce qui relève 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 à basse consommation en Franche-Comté).

À retenir

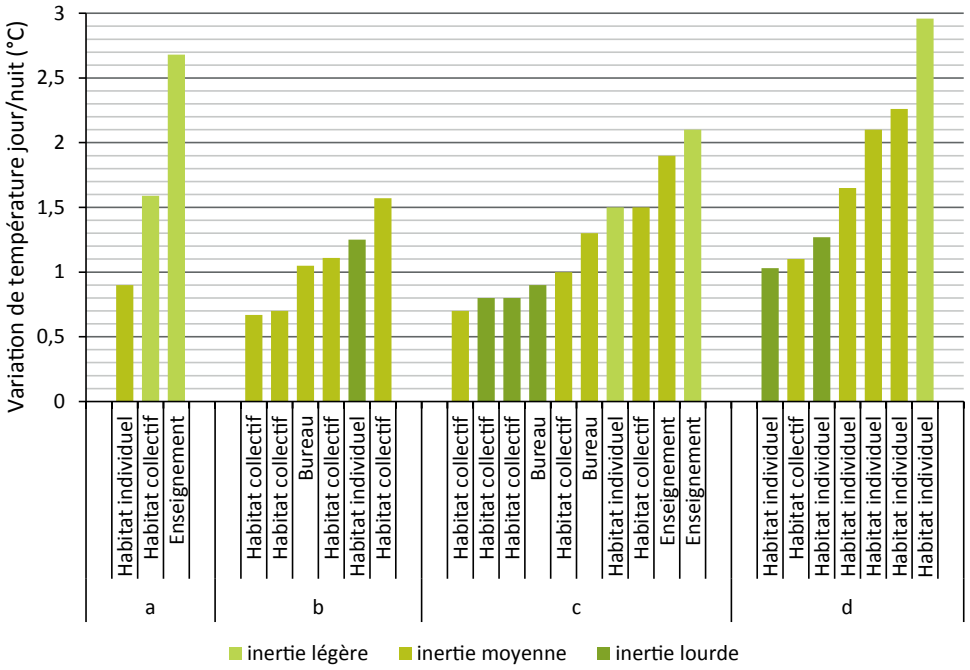
Les bâtiments à basse consommation sont plus sensibles à la qualité de la gestion thermique d'été du fait qu'ils sont conçus de manière à capter les apports solaires en hiver et les confiner avec les apports internes. L'obtention du confort thermique d'été dans les logements implique alors davantage les occupants dans l'utilisation des protections solaires et l'ouverture nocturne des fenêtres.

8.3.3 Les températures ne baissent guère la nuit

L'écart moyen jour/nuit de la température intérieure varie entre 1 et 3 °C.

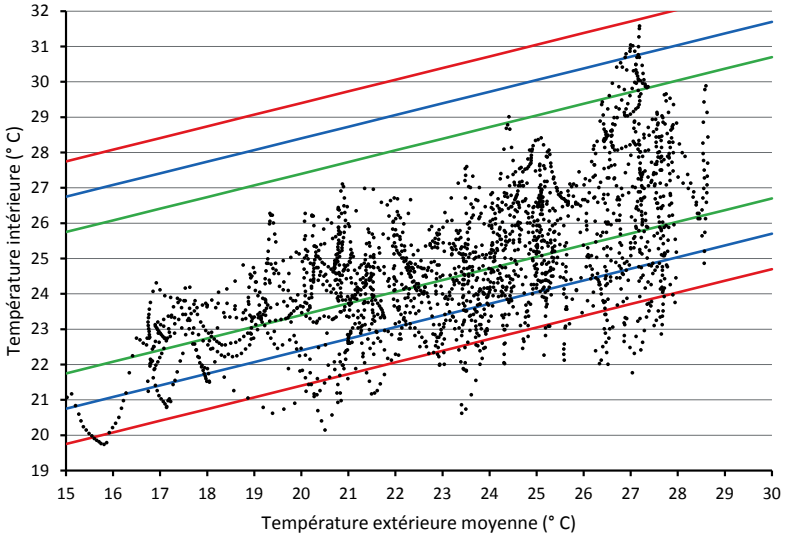
Les variations jour/nuit en zone a sont équivalentes à celles mesurées en zone méditerranéenne qui présente le plus de variation horaire dans la simulation climatique (température et ensoleillement) : ces variations ne sont pas très différentes d'un climat à l'autre.

Illustration 71 – Variation jour/nuit de la température intérieure



La variation la plus forte de 3 °C a été observée en zone méditerranéenne sur une maison individuelle à faible inertie (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 comme le montre le graphique ci après.

Illustration 72 – Diagramme du confort adaptatif d'une maison individuelle en Languedoc-Roussillon



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 à une plus forte inertie (qui restitue, la nuit, les apports internes et solaires absorbés le jour) et à une plus faible ventilation thermique d'été par ouverture des fenêtres.

La dispersion des résultats est principalement liée aux apports solaires et à leur gestion variable 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).

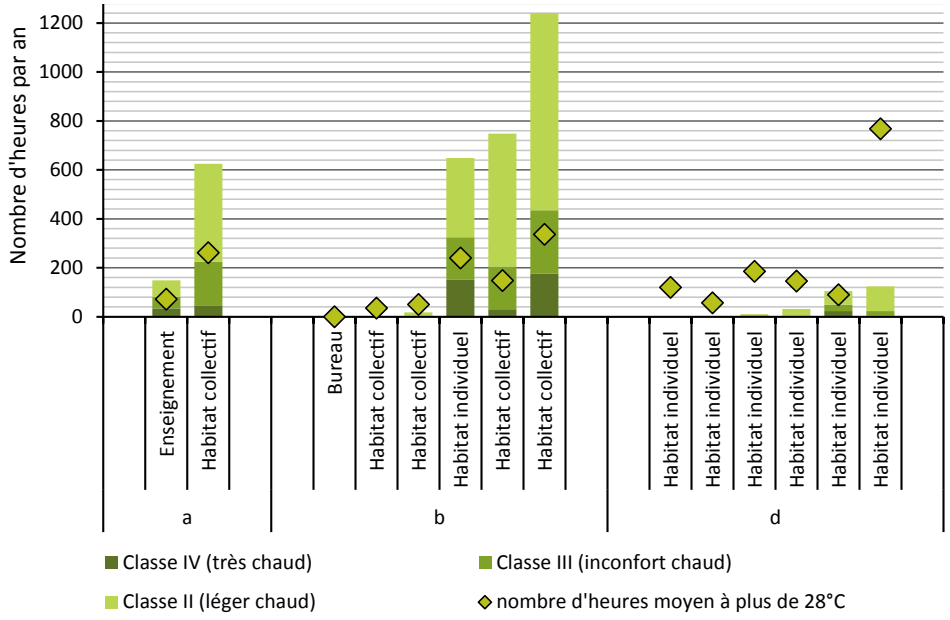
À retenir

En été les températures intérieures des bâtiments à basse consommation ne baissent guère la nuit, en particulier en habitat collectif du fait de l'inertie qui restitue les apports internes et solaires absorbés avantageusement le jour, mais aussi d'une ventilation thermique nocturne souvent trop faible dans la moitié Nord de la France pour les évacuer.

8.3.4 L'évaluation du confort thermique doit prendre en compte la rigueur climatique

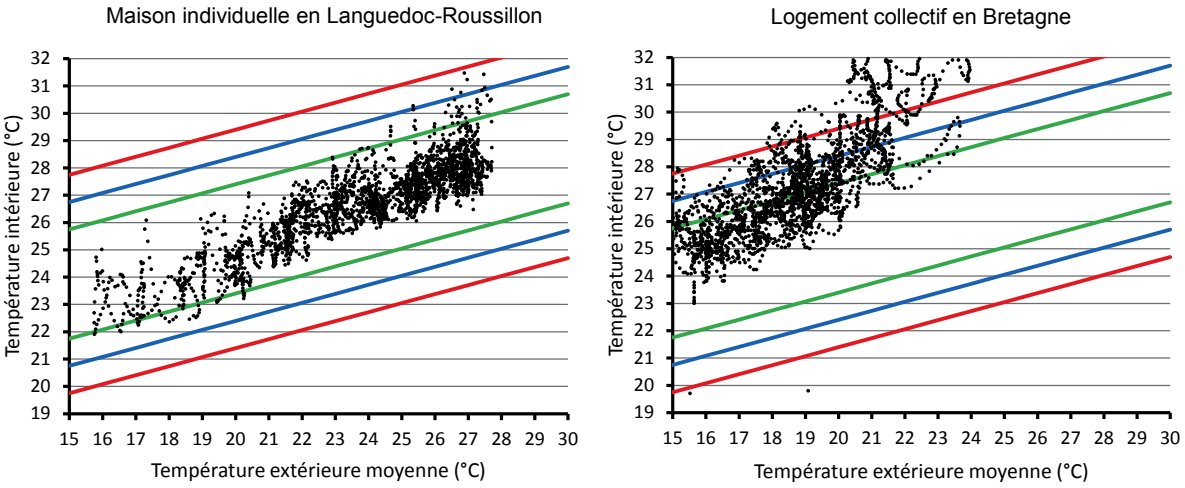
Les suivis du Cerema comprennent le calcul du **nombre d'heures d'inconfort selon la norme relative au confort adaptatif** (EN NF 15251), pour tenir compte du phénomène d'adaptation des usagers aux conditions extérieures de la période météorologique vécue (adaptation de l'habillement, des activités). Cette adaptation conduit en effet à la prise en compte des conditions météorologiques 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 en effet important de considérer les conditions de températures extérieures 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 même température élevée ; et plus la température extérieure est élevée les derniers jours, plus une température élevée est acceptée à l'intérieur des locaux. L'application de cette norme conduit à considérer les bâtiments à basse consommation en zone méditerranéenne comme très confortables (moins de 10 heures en classe II) en période de forte chaleur, alors que certains bâtiments situés en zone a et b le sont moins pour des températures extérieures plus clémentes.

Illustration 73 – Nombre d'heures d'inconfort selon la norme EN NF 15251



Dans l'exemple ci-après, les températures intérieures du logement collectif en Bretagne sont à température extérieure moyenne égale, supérieures de 4 à 5 °C à celles de la maison individuelle en zone méditerranéenne : ces températures sont effectivement ressenties comme inconfortables par les occupants. Ces résultats semblent en phase avec le ressenti recueilli dans les enquêtes auprès des occupants.

Illustration 74 – Diagramme du confort adaptatif d'une maison individuelle en Languedoc-Roussillon et d'un logement collectif en Bretagne



À retenir

La norme sur le confort adaptatif permet une évaluation plus fine du confort thermique en saison chaude que le critère du nombre d'heure à plus de 28 °C. Les résultats obtenus apparaissent davantage en phase avec le ressenti des occupants.

8.3.5 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 les paramètres socioculturels présentés au § 8.1. Par exemple, on constate qu'en été, le niveau de tolérance aux températures élevées est bien meilleur que dans les bâtiments climatisés ; le niveau d'attente étant très différent.

L'observation nous amène à privilégier également la piste des compétences techniques et socioculturelles nécessaires à la gestion d'un bâtiment à basse consommation par période de forte chaleur. Ainsi, les habitudes culturelles régionales sont plus ou moins favorables. Dans le Nord, le réflexe de fermeture des volets et des fenêtres est peu répandu en milieu de matinée pour se préserver de la chaleur. Au contraire, on privilégie l'ouverture des fenêtres et la ventilation naturelle en journée pour profiter de l'extérieur et de la lumière. La ventilation nocturne est par contre peu pratiquée à cause des baisses de température assez fréquentes la nuit. Dans les bâtiments à basse consommation, ces pratiques sont plus lourdes de conséquences que dans des bâtiments traditionnels.

À retenir

La gestion thermique d'un bâtiment à basse consommation nécessite des notions techniques ou des connaissances culturelles, en particulier sur la pratique d'ouverture des fenêtres la nuit et l'utilisation des protections solaires la journée (pour réduire les apports solaires). Ces pratiques sont relativement acquises en zone méditerranéenne mais restent à généraliser sur l'ensemble du territoire.

8.3.6 Quelques enseignements sur le rafraîchissement par ventilation mécanique thermique

Les suivis des bâtiments équipés de dispositifs de rafraîchissement par ventilation mécanique (puits thermiques[17], double flux avec bypass) nous renseignent sur leur mode de fonctionnement :

- les échangeurs des ventilations double flux doivent être neutralisés la nuit en période estivale (bypass de l'échangeur à plaque, arrêt de l'échangeur à roue) pour faciliter l'évacuation de la chaleur ;
- 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 bypass de la ventilation mécanique nocturne est insuffisant pour compenser la faiblesse de la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres, car les débits du double flux sont très inférieurs à ceux résultant de l'ouverture des baies.

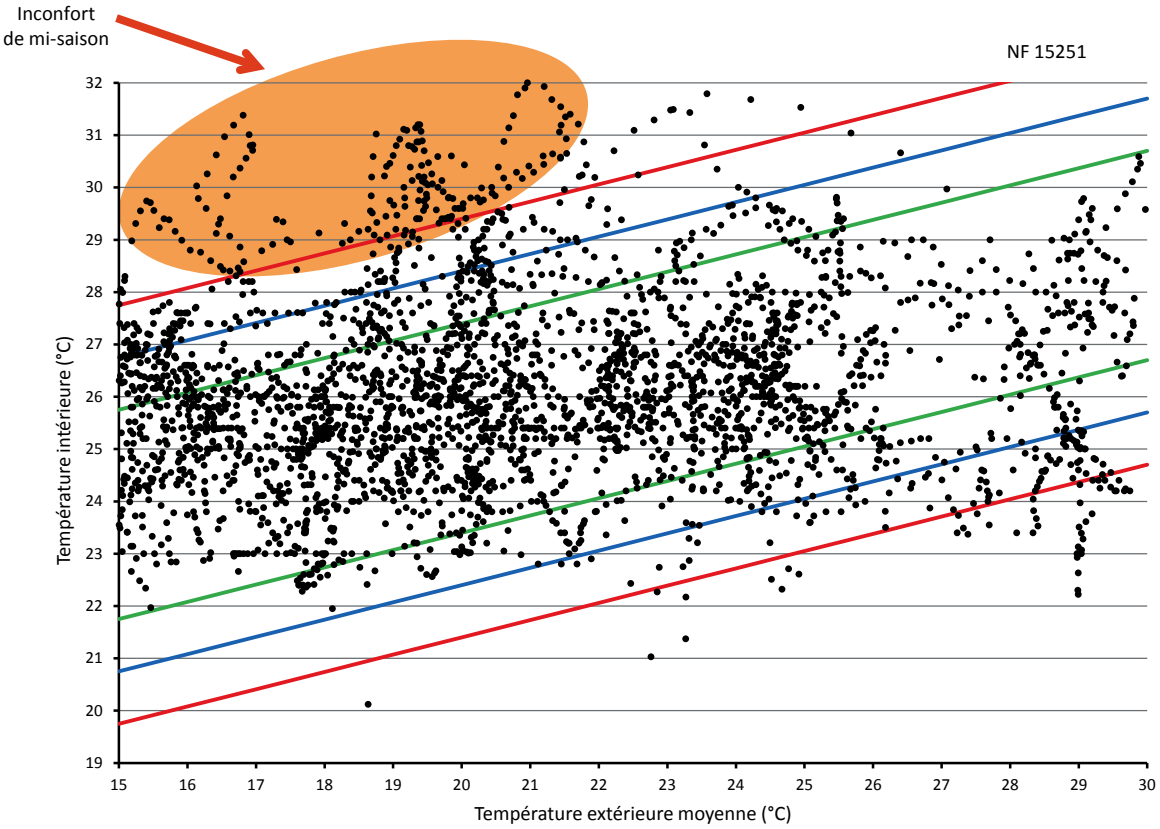
17. Puits provençal ou puits canadien.

8.4 Confort thermique de mi-saison

En mi-saison, les valeurs de température intérieure obtenues en application de la norme EN NF 15251 peuvent être parfois en dehors des plages de confort.

C'est le cas d'un bâtiment collectif en zone c qui présente des températures intérieures de plus de 29 °C lorsque la température extérieure moyenne est inférieure à 20 °C.

Illustration 75 – Diagramme du confort adaptatif d'un logement collectif en zone c en mi-saison



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 ;
- 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.

À retenir

Certains bâtiments présentent des niveaux de température très élevés en mi-saison.

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 2015 sur 60 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 quelques 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 connaissance 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 aux consommations des bâtiments de la génération précédente construits suivant la réglementation thermique 2005. Il apparaît désormais que les consommations réelles de chauffage ont été drastiquement réduites et descendent en moyenne en dessous des 25 $kWh_{ep}/m^2.an$. Les consommations de chauffage 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 ou les usages de l'énergie hors réglementation thermique. Les consommations liées aux équipements mobiliers (informatiques, multimédia...) et immobiliers non réglementés (ascenseurs par exemple) sont équivalentes à la consommation des postes réglementés pour les bureaux et de l'ordre de 70 $kWh_{ep}/m^2.an$ dans les habitations. Le choix et l'utilisation de ces équipements représenteront à l'avenir 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. À titre d'exemple, les niveaux d'isolation constatés sur les bâtiments de l'échantillon du nord de la France sont extrêmement performants. Côté mise en œuvre, la perméabilité à l'air des enveloppes est très souvent faible, 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 cette étude qui a consisté à comparer la consommation calculée en phase de conception et la consommation mesurée pendant deux ans d'utilisation. Tout d'abord, il est apparu que cette comparaison entre les consommations calculées en phase de conception et les consommations réelles ne peut pas être réalisée directement. En effet, les premiers résultats soulignent l'importance des conditions d'occupation et météorologiques dans l'explication des consommations mesurées. Or, autant la météorologie que l'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 varier d'une année à l'autre de l'exploitation. 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 $kWh_{ep}/m^2.an$ sur l'échantillon. De la même manière, la variation des conditions météorologiques peut entraîner des écarts de consommation allant jusqu'à 10 $kWh_{ep}/m^2.an$.

Il est donc nécessaire d'élaborer une méthodologie adéquate pour réaliser 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. Dans ces conditions, l'écart entre les consommations réelles et recalculées trouve son explication dans les facteurs inchangés, c'est-à-dire la qualité de conception et de mise en œuvre des matériaux et des systèmes.

Au regard des analyses qui ont pu être menées sur 17 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 est au plus de 20 à 60 $kWh_{ep}/m^2.an$. 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, de par l'imprécision dans l'information recueillie (scénario de fermeture des occultations par exemple) ou 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 des limites et des incertitudes qu'il est encore nécessaire d'étudier et de quantifier.

Cependant, les évaluations ciblées sur l'enveloppe et les systèmes permettent d'expliquer une partie de cet écart par la performance réelle de l'enveloppe mise en œuvre, ou 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, d'une part, et le réglage et la gestion des systèmes, d'autre part, représentent des leviers d'amélioration de la performance énergétique.

Par ailleurs, 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. En effet, un confort plus élevé a pu être plus consommateur et un inconfort, ressenti ou perçu, a pu amener l'occupant à contrarier les systèmes. Le confort thermique a été plus particulièrement mesuré et enquêté. Il 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.

Plus généralement, 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 de la réalisation et de la conception : c'est en fait l'ensemble du système d'acteurs qui est concerné. Ainsi ont pu être observés, notamment, des usages inadaptés de certains dispositifs par les occupants ou les gestionnaires ; cependant ceux-ci trouvent souvent une partie de leur source dans le ressenti d'un inconfort ou le manque d'anticipation, à la conception, du contexte d'utilisation futur et de l'expertise à mobiliser.

Avec un échantillon d'opérations encore plus important, la prochaine capitalisation 2016 permettra de consolider ces enseignements portant sur les bâtiments à basse consommation et de traiter quelques nouveaux sujets, dont les aspects économiques. L'analyse sera approfondie sur chacun des thèmes traités, en mettant davantage l'accent sur la prise en compte de la composante humaine. En effet, à l'issue de ces premiers travaux il ne fait plus de doute que l'étude de la performance réelle et l'identification de ses leviers d'actions nécessitent une analyse croisée du fonctionnement technique du bâtiment et des comportements et jeux d'acteurs en présence.

© Cerema

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, horizontal) 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 à des masques par exemple (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 re-calcul selon la méthode de calcul Th-CE 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 ;
- 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 (cf. A.2.3).

A.2.2 Estimation des apports internes

Pour le re-calcul 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 ex. 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, 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 :

$$AI_{évalué} = \frac{AI_{calculé} \times Occupation_{réelle}}{Occupation_{réglementaire}}$$

avec :

$AI_{évalué}$: les apports internes équivalents par rapport à la période d'occupation réglementaire (W/m²) ;

$AI_{calculé}$: les apports internes calculés par rapport à la période d'occupation réelle (W/m²) ;

$Occupation_{réelle}$: la durée de la période d'occupation réelle (heures) ;

$Occupation_{réglementaire}$: 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 :

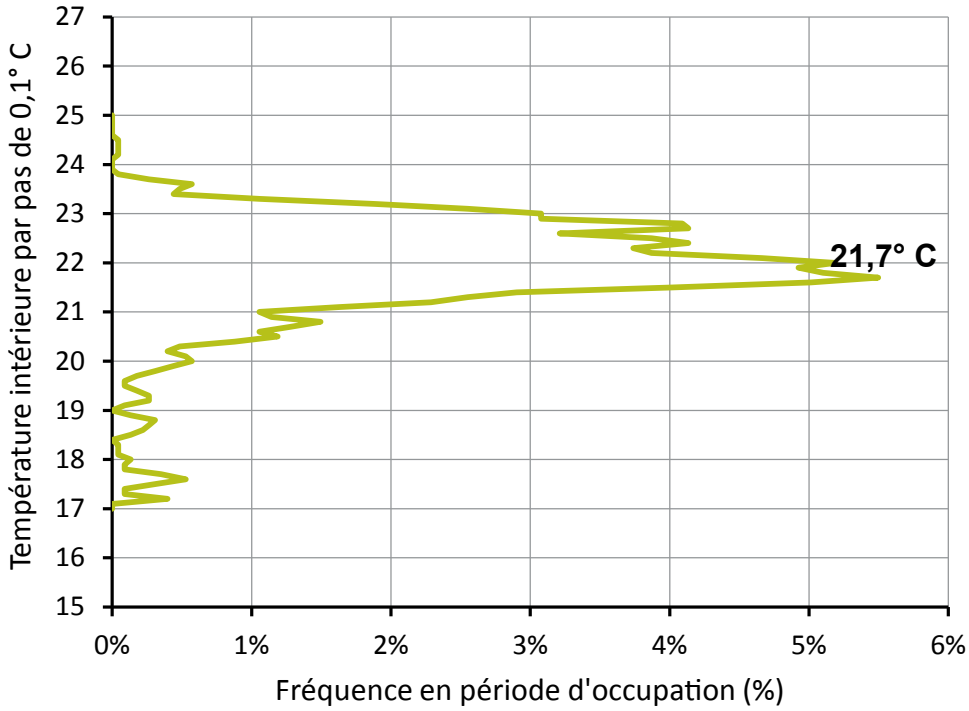
$$AI_{évalué} = \frac{4{,}1\,W/m^2 \times 168\,heures \times 52\,semaines}{128\,heures \times 52\,semaines} = 5{,}3\,W/m^2$$

Les apports internes évalués sont donc de 5,3 W/m² par rapport à l'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 76 – 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-là, 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, fonction de la destination d'usage du bâtiment (logement, bureau, hôtel, etc.) des règles Th-CE 2005 (tableaux 36 ci-dessous et 37 du chapitre 10 relatif aux besoins d'ECS).

Besoins unitaires hebdomadaires d'ECS à 40 °C (règles Th-CE 2005)

Types d'usages	a	Nu
Maisons individuelles	= (470.9 ln(Nu) - 1075)/Nu si Nu > 27 m² = 17.7 sinon	m² de surface habitable
Logements collectifs	= (470.9 ln(Nu_lgt) - 1075)/Nu_lgt si Nu_lgt ≥ 27 m² = 17.7 sinon Avec Nu_lgt = Nu/nbre_lgt	m² 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 tel 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 $U_{bât\ évalué}$.

A.3.2 Détermination d'$U_{bât\ évalué}$

Le coefficient de déperdition thermique du bâtiment $U_{bât}$ est reconstitué à partir d'un bilan thermique des mesures sur une semaine de chauffe, selon la méthode d'équilibre des flux thermiques entrants et sortants 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 (cf. Illustration 77) :

$$Q^{app.chauf} + Q^{app.int} + Q^{app.sol} + Q^{pert.ventil} + Q^{pert.permea} + Q^{pert.env} = 0$$

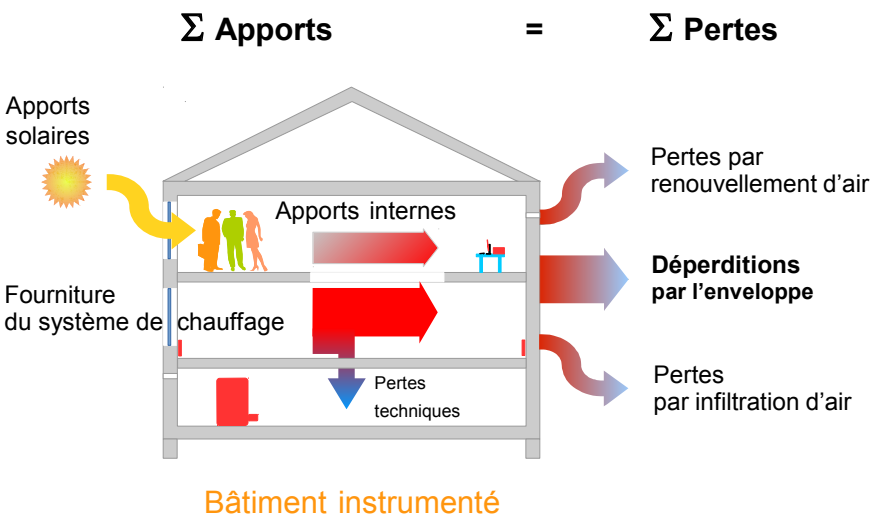
soit :

$$Q^{app.chauf} + Q^{app.int} + Q^{app.sol} + Q^{pert.ventil} + Q^{pert.permea} + U_{bât}\,(T_i - T_e) \times A_{env} = 0$$

avec :

- $Q^{app.chauf}$: la production de chauffage délivrée en zone chauffée au bâtiment ;
- $Q^{app.int}$: les apports internes du bâtiment ;
- $Q^{app.sol}$: les apports solaires reçus au sein du bâtiment ;
- $Q^{pert.ventil}$: les pertes liées au renouvellement de l'air par ventilation ;
- $Q^{pert.permea}$: les pertes liées au renouvellement de l'air dû aux défauts d'étanchéité à l'air du bâtiment ;
- $Q^{pert.env}$: 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 77 – Flux thermiques entrants et sortants 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 :

$$P_{ventilateur} = 0{,}34 \times Débit \times (T_{entrant} - T_{sortant}) / 1\,000$$

- les **déperditions liées à l'étanchéité à l'air** du bâtiment sont calculées selon les règles Th-CE à partir de la mesure d'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.

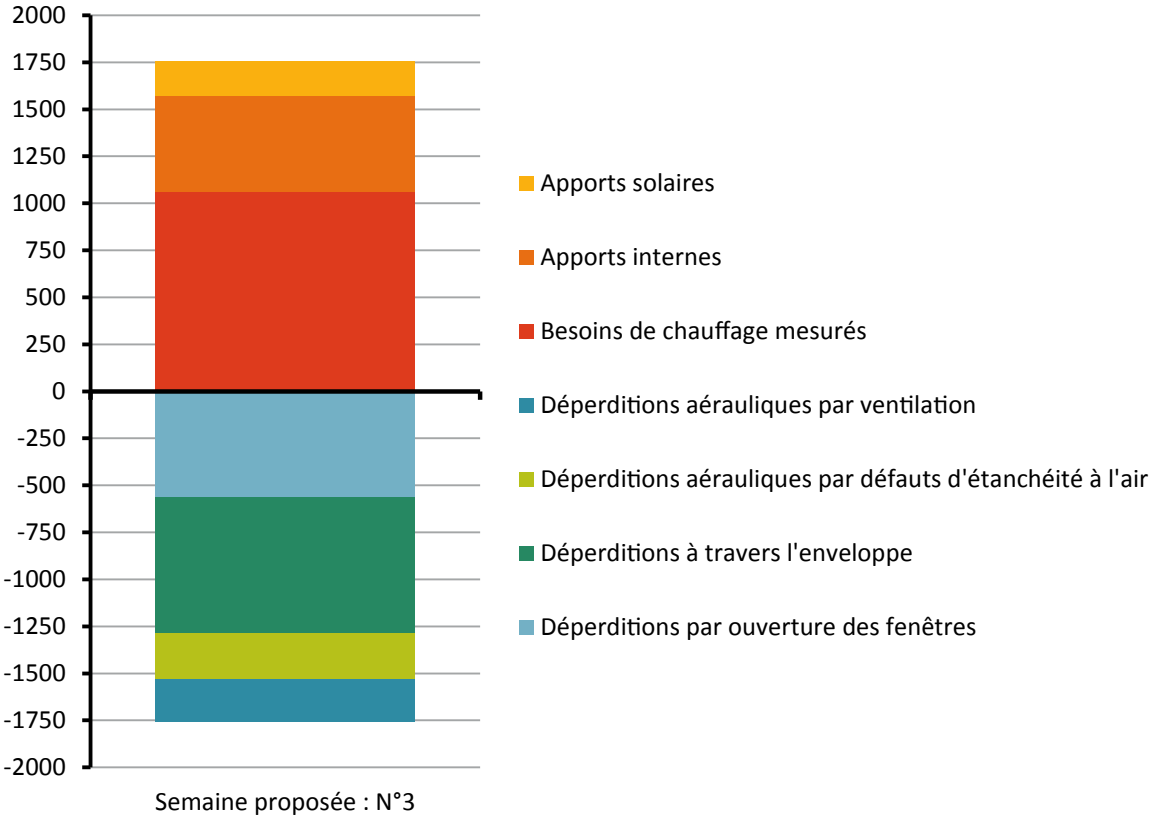
Le $U_{bât}$ retenu correspond à la valeur qui répond au mieux à l'équilibre thermique en période froide en considérant le $U_{bât}$ comme constant. Le choix des semaines se fait sur la base de plusieurs critères :

- 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 $U_{bât}$ 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 $U_{bât\ évalué}$ ainsi obtenu traduit la performance de l'enveloppe modulo les actions de l'occupant non prises en compte.

Illustration 78 – 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/débits 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 du calcul, les déperditions par ventilation étant en général le deuxième poste de déperdition après celles par transmission thermique et l'incertitude relevée se trouvant 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 source d'incertitudes. Toutefois, même si ces apports internes ne sont pas négligeables, le niveau d'incertitude reste limité et est 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 Ventilation double flux

La performance de la ventilation est caractérisée, d'une part, par l'énergie récupérée, et d'autre part, par son efficacité.

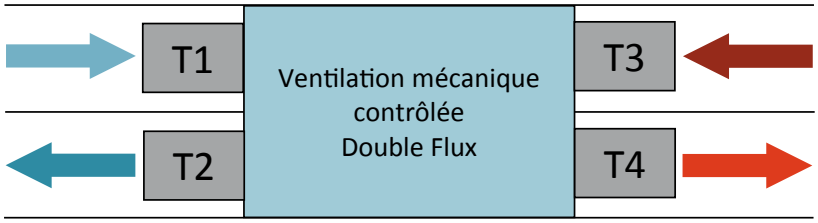
La formule de l'énergie récupérée instantanée est la suivante :

$$Energie\,récupérée = \left|(T_4 - T_1)\right| \times Débit \times Cp \times \rho \quad \text{en Wh}$$

avec :

- ρ : la masse volumique de l'air (1,25 kg/m³) ;
- C_p : la capacité thermique massique de l'air (1 005 J/kg.K) ;
- $Débit$: le débit horaire mesuré (ou débit fixe) ;
- T_1 : la température extérieure échangeur (°C), correspondant à la température de l'air venant de l'extérieur avant l'entrée dans l'échangeur ;
- T_4 : la température d'air soufflé (°C), correspondant à l'air soufflé vers l'intérieur juste après son passage dans l'échangeur de chaleur.

Illustration 79 – 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 d'air rejeté (°C) ;
- T_3 : la température d'air repris (°C), correspondant à la température de l'air intérieur avant l'entrée dans l'échangeur ;
- T_4 : la température d'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 où 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.

A.4.2 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.

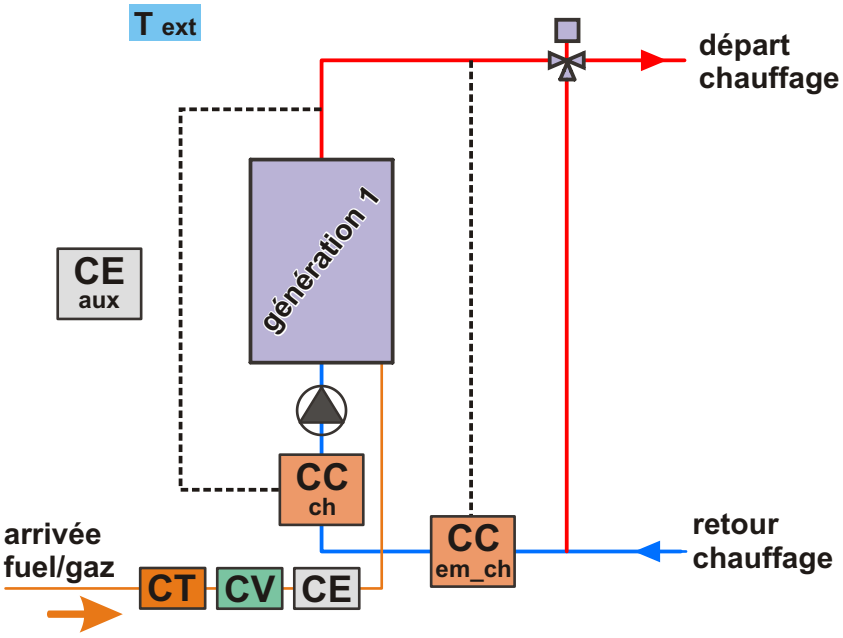
La formule est la suivante :

$$Rendement = \frac{\Sigma énergie\ produite}{PCI \times \Sigma énergie\ consommée}$$

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 80 – Principe de mesure d'une chaudière



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.4.3 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.

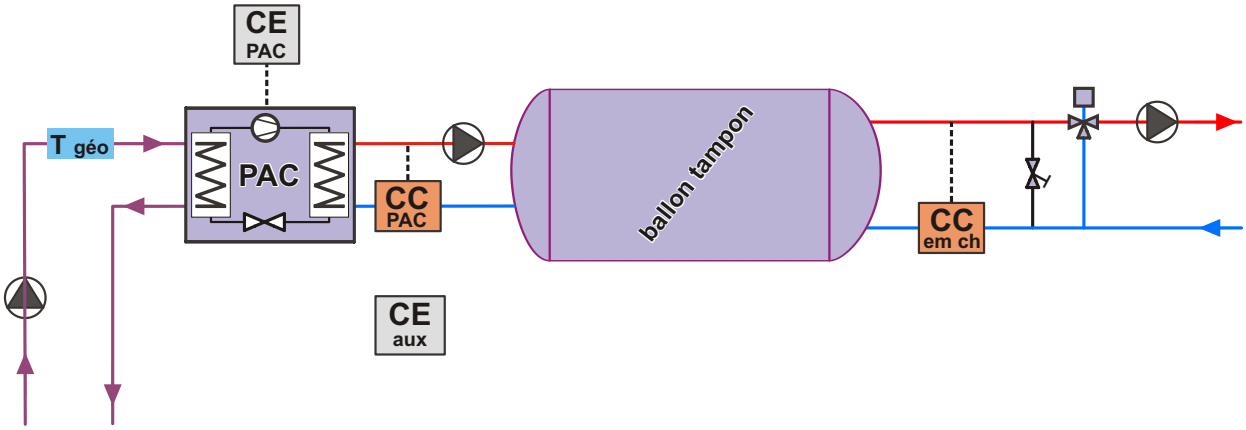
Le COP moyen correspond au rapport entre la production totale d'énergie produite sur la période d'étude et la consommation de la PAC sur cette même période :

$$COP = \frac{\sum Energie\ produite}{\sum Energie\ consommée}$$

ou bien :

$$COP = \frac{\sum Energie\ produite}{\sum Energie\ consommée - \sum Conso\ des\ auxiliaires}$$

Illustration 81 – Principe de mesure d'une PAC

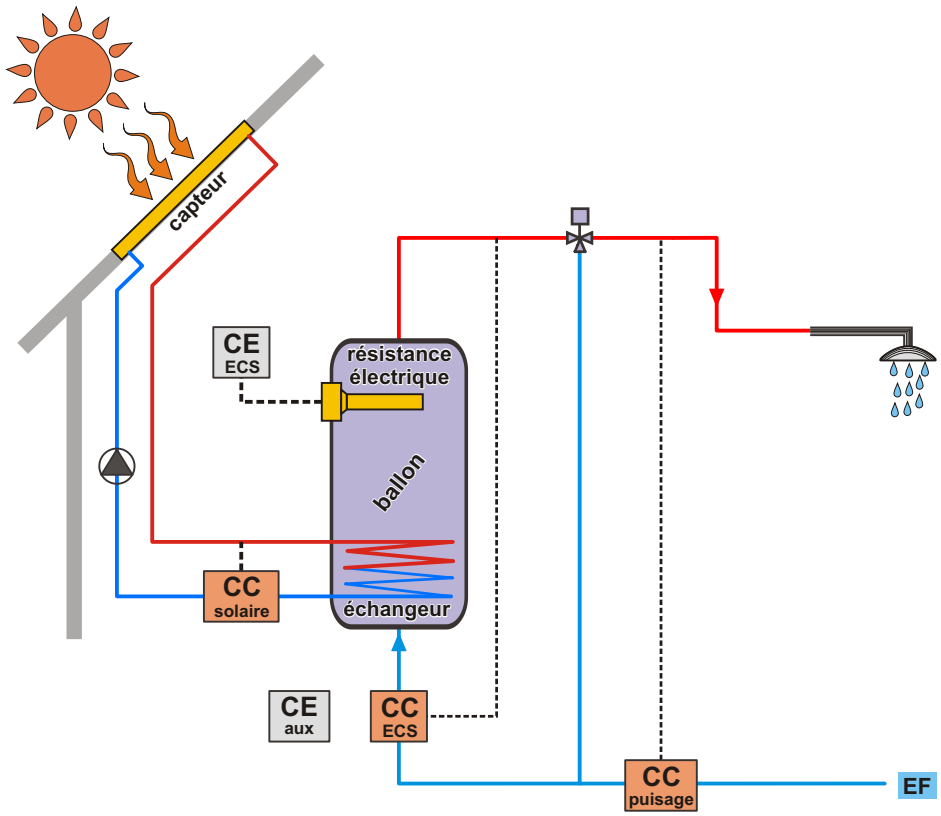


A.4.4 L'eau chaude sanitaire solaire

Sur un système d'eau chaude sanitaire solaire (ECS solaire), il est possible de mesurer les trois données suivantes (cf. Illustration 82) :

- les besoins en ECS (Besoins) ;
- l'énergie fournie par les panneaux solaires (ECS solaire) ;
- l'énergie fournie par l'appoint (Appoint).

Illustration 82 – 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) :

$$Besoins\ d'ECS = ECS\ solaire + Appoint$$

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 :

$$Couverture\ solaire = \frac{\sum ECS\ solaire}{\sum besoins\ d'ECS}$$

A.4.5 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 :

$$Energie\,récupérée = \left|(T_i - T_e)\right| \times Débit \times Cp \times \rho \quad \text{en kWh}$$

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 (1 005 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).

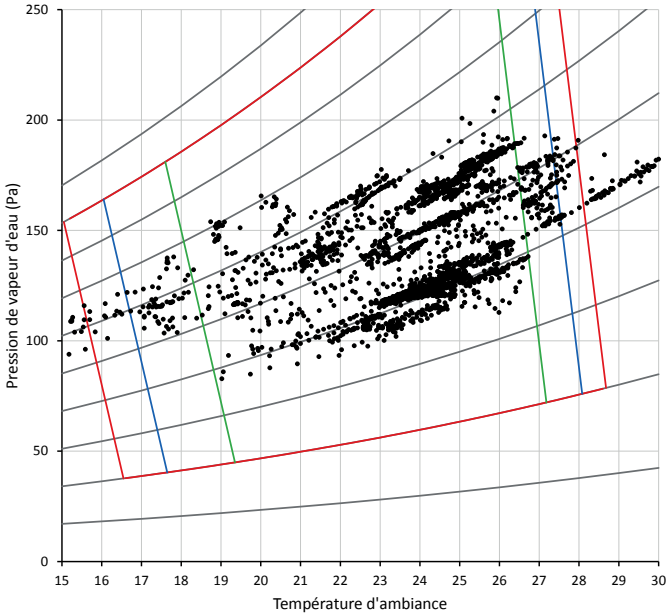
L'énergie froide récupérée correspond à l'énergie libérée par l'air chaud lors de son passage dans le puits canadien. Elle se calcule de la même manière que l'énergie chaude récupérée. Cependant, elle est calculée uniquement si la température de l'air extérieur est supérieure à 25 °C et si la différence de température avec l'air intérieur est supérieure à 2 °C.

A.5 Analyse du confort thermique

L'analyse du confort d'été 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 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 83 – Exemple de diagramme de l'air humide pour un logement en été

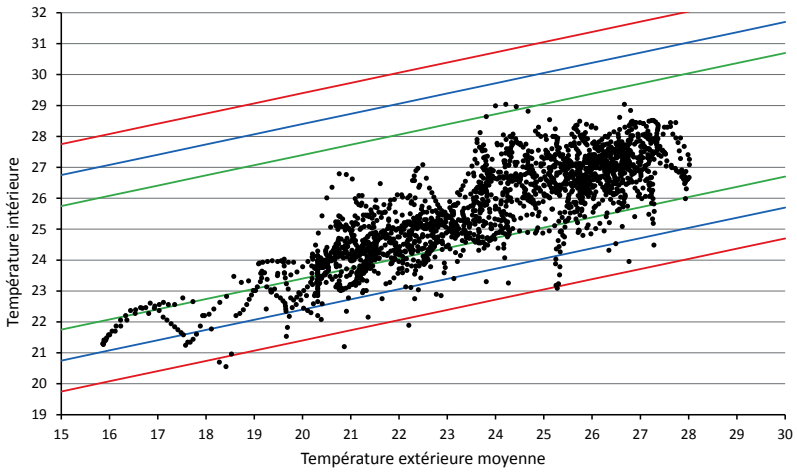


- nombre d'heures d'inconfort correspondant au niveau d'ambiance de type IV de la norme EN NF 15251 (annexe A). Il prend en compte l'adaptation physiologique des usagers à l'épisode météorologique. Le nombre d'heures selon les différentes catégories de confort de la norme EN NF 15251 en ambiance non contrôlée et en ambiance contrôlée est également fourni ;

Illustration 84 – 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	2 075 h
Catégorie II +	1 236 h	16 h
Catégorie III +	33 h	0 h
Catégorie IV +	57 h	0 h

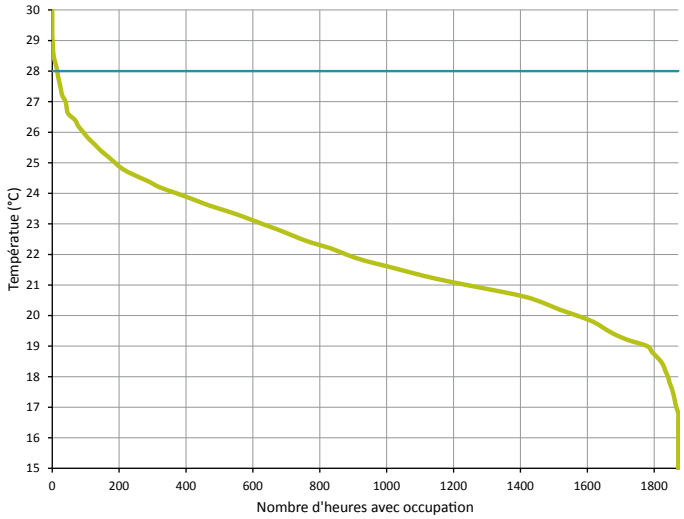
Illustration 85 – Exemple de graphique des températures acceptables selon EN NF 15251 pour un logement en été



- fréquence cumulée des températures, et, pour l'été, le nombre d'heures supérieures à 28 °C ;

Illustration 86 - Exemple de fréquence cumulée de températures pour un logement en été

- température intérieure conventionnelle de confort thermique d'été *in situ* ($Tic_{in\ situ}$) : « 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.



© Ademe

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 13

MÉTHODE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES ET DU CONFORT 15

1. Une méthode tournée vers la caractérisation *in situ* et l'explication des écarts de consommation 15
2. Différents objectifs d'évaluation basés sur les mesures 16
3. Une méthode de suivi associant mesure, observation et enquête 16
4. Une méthode spécifique d'analyse des écarts entre consommation mesurée et consommation de l'étude thermique 17

CONSOMMATIONS ET PRODUCTIONS MESURÉES 21

1.1 Répartition des postes de consommation 22
- 1.1.1 Une part importante des postes non réglementés 22
- 1.1.2 Une répartition des postes réglementés en évolution 27

1.2 Évolution des consommations les premières années de suivi 30

1.3 Production d'électricité photovoltaïque 32

CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES 35

2.1 Influence des paramètres météorologiques 36

2.2 Niveaux de température extérieure hivernale 37

2.3 Impact sur la consommation de chauffage 38

CONDITIONS D'OCCUPATION 41

3.1 Température de chauffage 42
- 3.1.1 Les températures de consigne constatées 42
- 3.1.2 Impact calculé des températures de consigne pratiquées sur la consommation de chauffage 43

3.2 Apports internes 46
- 3.2.1 Des apports internes hors éclairage très variables 46
- 3.2.2 Des périodes d'occupation importantes 47
- 3.2.3 Impact calculé des apports internes constatés sur la consommation de chauffage 49

3.3 Combinaison des conditions météorologiques et d'occupation 51

PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DU BÂTI 53

4.1 Caractéristiques des enveloppes de l'échantillon 54
4.1.1 L'isolation des parois verticales opaques 55
4.1.2 L'isolation des planchers bas 57
4.1.3 L'isolation des planchers hauts 57
4.1.4 L'isolation des baies vitrées 57

4.2 Conception bioclimatique 58

4.3 Isolation thermique de l'enveloppe 60
4.3.1 Coefficient de déperdition par transmission thermique à la conception ($U_{bât}$) 60
4.3.2 Mise en œuvre de l'isolation 61
4.3.3 Coefficient évalué de déperdition par transmission thermique ($U_{bât\ évalué}$) 62
4.3.4 Impact calculé du $U_{bât\ évalué}$ sur la consommation de chauffage 63

4.4 Perméabilité à l'air de l'enveloppe 64

PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES SYSTÈMES TECHNIQUES 67

5.1 Chauffage 68
5.1.1 Des générateurs de chaleur performants mais parfois surdimensionnés 68
5.1.2 Des réseaux de distribution dont l'isolation pourrait être améliorée 72
5.1.3 Des émetteurs de chaleur généralement à basse température 72
5.1.4 Des systèmes de régulation qui posent parfois des problèmes 73

5.2 Eau chaude sanitaire 74
5.2.1 Des systèmes de production divers 74
5.2.2 Des consommations d'énergie très variables 75
5.2.3 Des productions solaires à maîtriser 76
5.2.4 Des distributions aux pertes non négligeables 77

5.3 Ventilation 79
5.3.1 Une prédominance des systèmes double flux dans l'échantillon 79
5.3.2 Des échangeurs double flux qui tiennent leurs promesses 80
5.3.3 Des consommations plus élevées en double flux 81
5.3.4 Des pratiques à optimiser 82

5.4 Auxiliaires 84

5.5 Refroidissement 85

5.6 Éclairage 86
5.6.1. Des consommations très variables 86
5.6.2. De faibles consommations dans les logements 88
5.6.3. Des systèmes de gestion pas toujours maîtrisés 88
5.6.4. Des éclairages extérieurs parfois trop consommateurs 89

5.7 Autres équipements immobiliers 90
5.7.1 Ascenseurs 90
5.7.2 Sécurité incendie 92
5.7.3 Interphones, portes automatiques et sèche-mains 92

5.8 Équipements mobiliers 93
5.8.1 Ordinateurs 94
5.8.2 Serveurs bureautiques 94
5.8.3 Autres équipements bureautiques 96
5.8.4 Autres équipements mobiliers 96
5.8.5 Postes de consommation en logement 97

PERFORMANCES D'ENSEMBLE DU BÂTIMENT 99

6.1 Performances attendues et mesurées 100

6.2 Explication des écarts constatés 101

PRATIQUES DES ACTEURS 105

7.1 Acteurs de la construction-rénovation 106

7.2 Des acteurs de la construction à ceux de l'utilisation 108

CONFORT THERMIQUE ET QUALITÉ D'USAGE 111

8.1 Satisfaction des occupants et confort perçu 112

8.2 Confort thermique d'hiver 113

8.3 Confort thermique d'été 114

8.3.1 Le niveau de confort en saison chaude des bâtiments non climatisés varie d'excellent à passable 115

8.3.2 Le niveau de confort varie au sein d'un même bâtiment selon les modes d'occupation 116

8.3.3 Les températures ne baissent guère la nuit 116

8.3.4 L'évaluation du confort thermique doit prendre en compte la rigueur climatique 118

8.3.5 Les pratiques de gestion thermique d'été sont culturelles 119

8.3.6 Quelques enseignements sur le rafraîchissement par ventilation mécanique thermique 120

8.4 Confort thermique de mi-saison 121

CONCLUSION 122

ANNEXES - DÉTAIL DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION MISE EN ŒUVRE PAR LE CEREMA 125

A.1 Conditions météorologiques de l'année de suivi 125

A.2 Conditions d'occupation de l'année de suivi 125

A.2.1 Scénario d'occupation 126

A.2.2 Estimation des apports internes 126

A.2.3 Température de consigne observée 127

A.2.4 Besoins d'eau chaude sanitaire (ECS) 128

A.3 Caractérisation de la performance de l'enveloppe 129

A.3.1 Suivi de chantier et mesure à réception 129

A.3.2 Détermination d'$U_{bât\ évalué}$ 129

A.4 Caractérisation de la performance des systèmes 132

A.4.1 Ventilation double flux 132

A.4.2 Chaudière (gaz, fioul, bois) 133

A.4.3 Les pompes à chaleur (air/eau, eau/eau, sol/eau) 134

A.4.4 L'eau chaude sanitaire solaire 135

A.4.5 Le puits canadien 136

A.5 Analyse du confort thermique 136

GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS 143

CONVENTIONS DE PRÉSENTATION DES CONSOMMATIONS 145

GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS

Auxiliaires :
appareils électriques nécessaires au fonctionnement des installations de chauffage/refroidissement des locaux et d'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.

ECS :
eau chaude sanitaire.

PAC :
pompe à chaleur.

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 5 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.

CONVENTIONS DE PRÉSENTATION DES CONSOMMATIONS

Dans ce document, **toutes les consommations** sont données en **énergie primaire**, sauf indication contraire, et **toujours par surface hors œuvre nette** (kWh_{ep} / m^2_{SHON} / an). Pour simplifier, cette unité sera notée : **$kWh_{ep}/m^2.an$**.

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

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 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 (cf. 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.

© 2015 - Cerema

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, créé au 1er janvier 2014 par la fusion des 8 CETE, du Certu, du Cetmef et du Sétra.

Le Cerema est un établissement public à caractère administratif (EPA), sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère du Logement, de l'Égalité des territoires et de la Ruralité. Il a pour mission d'apporter un appui scientifique et technique renforcé, pour élaborer, mettre en œuvre et évaluer les politiques publiques de l'aménagement et du développement durables, auprès de tous les acteurs impliqués (État, collectivités territoriales, acteurs économiques ou associatifs, partenaires scientifiques).

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination maquettage : service éditions Cerema Territoires et ville (B. Daval)
Maquettage et mise en page : Cerema Centre-Est (F. Berland)
Photo couverture : ZAC de Bonne/Grenoble © Arnaud Bouissou/MEDDE-MLETR
Impression : Zimmermann - Villeneuve-Loubet - Tél. : 04 93 22 58 16 - Label Imprim'vert
Imprimé sur papier couché demi-mat PEFC
Achevé d'imprimer : janvier 2016
Dépôt légal : janvier 2016
ISBN : 978-2-37180-107-3
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 60 constructions et rénovations du programme PREBAT 2012 - 2015

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, 60 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, mais aussi l'importance qu'ont maintenant les pratiques de pilotage et d'utilisation dans la maîtrise des consommations, mais aussi du confort d'été.

Sur le même thème

Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie
Enseignements opérationnels
Évaluations 2012-2015
Fiche de synthèse
2015

Réduire l'impact environnemental des bâtiments
Agir avec les occupants
2013

Prise en compte des usages dans la gestion patrimoniale des bâtiments - Série de fiches
- Fiche n°1 : l'approche britannique : le « challenge 10 % »
- Fiche n°2 : « Energie Cup » : un concours pour réduire les consommations dans le Land de Hesse (Allemagne)

En téléchargement gratuit sur : catalogue.territoires-ville.cerema.fr

ADEME 8680 | janvier 2016 | 300 ex.

Aménagement et développement des territoires, égalité des territoires - Villes et stratégies urbaines - Transition énergétique et changement climatique - Gestion des ressources naturelles et respect de l'environnement - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Gestion, optimisation, modernisation et conception des infrastructures - Habitat et bâtiment

ISSN: 2417-9701
ISBN: 978-2-37180-107-3

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement – www.cerema.fr
Direction technique 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