



HAL
open science

Efficacité énergétique et comportement de l'utilisateur

Abbas Abbas

► **To cite this version:**

Abbas Abbas. Efficacité énergétique et comportement de l'utilisateur. Génie civil. Université Montpellier, 2021. Français. NNT : 2021MONT032 . tel-03360210

HAL Id: tel-03360210

<https://theses.hal.science/tel-03360210>

Submitted on 30 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Doctorat

École doctorale INFORMATION STRUCTURES SYSTÈMES

Unité de recherche LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVIL

Efficacité énergétique et comportement de l'utilisateur

Présentée par Abbas ABBAS

Le 17 juin 2021

Sous la direction de Jean-François DUBÉ
Et Franck CÉVAËR

Devant le jury composé de

Etienne WURTZ, Directeur de recherche CEA, CEA-INES

Chadi MAALOUF, Maître de conférences HDR, Université de Reims

Jean CASTAING-LASVIGNOTTES, Maître de Conférences, Université de la Réunion

André CHRYSOCHOOS, professeur des universités, Université de Montpellier

Jean-François DUBÉ, professeur des universités, Université de Montpellier

Franck CÉVAËR, Maître de conférences, Université de Montpellier

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Directeur de thèse

Co-directeur de thèse



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement les membres du jury qui, à travers leur intérêt pour mes travaux, ont donné de la valeur à mes recherches. Monsieur Étienne WURTZ, président du jury de thèse, a accepté de me consacrer son temps en examinant le manuscrit. J'en suis honoré et je lui exprime toute ma profonde reconnaissance. Mes remerciements vont également à Messieurs Chadi MAALOUF et Jean CASTAING-LASVIGNOTTES, qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse et dont les remarques et commentaires m'ont permis de corriger certaines erreurs et d'améliorer la compréhension de ce mémoire. Mes remerciements vont aussi à M. André CHRYSOCHOOS d'avoir accepté avec beaucoup d'élan d'être l'examineur de ce travail. Cela a été une grande fierté pour moi que M. préside mon jury de thèse.

Je tiens à remercier Nîmes Métropole pour m'avoir accordé un financement pour les trois ans du travail.

Ma thèse n'aurait pas pu exister sans le profond engagement de mes encadrants qui m'ont aidé et soutenu durant ces trois années de thèse. Je remercie Jean-François DUBÉ, mon directeur de thèse et je désire lui exprimer toute ma reconnaissance, tant du point de vue scientifique qu'humaine. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

J'exprime ma profonde gratitude à Franck CÉVAËR, mon co-directeur de cette thèse, pour son soutien dans la réalisation de ce projet. Ses conseils et sa confiance qu'il m'a accordés ont été d'une aide précieuse pour l'aboutissement de ma thèse. Un grand merci pour son engagement, sa participation aux discussions de fond, ses suggestions éclairées et critiques honnêtes, son enthousiasme, ses encouragements auront été pour moi essentiels et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche mais aussi pour sa relecture pointilleuse du manuscrit de thèse. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral.

Je tiens à remercier très vivement et individuellement tous les membres de l'équipe SIGECO du LMGC ainsi que ceux du département de Génie Civil de l'IUT de Nîmes, anciens ou actuels, pour leur accueil chaleureux, l'ambiance sympathique et les moments que nous avons partagés.

Je tiens à remercier Arnaud RIEUX, Mathias DIEGO, Laurent BARAILLE techniciens du département de Génie civil qui m'ont apporté une aide précieuse pour la mise en fonctionnement du bâtiment. Au niveau humain, je leur remercie du temps passé ensemble.

Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance envers l'ensemble du personnel du service administratif de l'IUT de Nîmes pour l'accueil et l'aide qu'ils m'ont apportée durant ces trois années. J'adresse mes remerciements en particulier à Madame Christine FONTAINE secrétaire administrative de l'Iut de Nîmes pour sa disponibilité et son soutien. Un grand merci également aux collègues techniciens de l'IUT, notamment Christophe BOUCHET, Frédéric VASSEUR, Frédéric VEYRIE Paul FORNER qui m'ont bien aidé dans l'installation des équipements et la réalisation de ce projet.

Je remercie Thierry FIOL, Stéphane REYES, Nabil BOUREGHDA du département Génie Electrique et Informatique Industrielle de l'IUT pour leur précieux conseils et leur renseignements ainsi que Grégori GOSSELET du département Génie Mécanique et Productique pour son aide.

A titre plus personnel, un grand merci pour les professeurs à l'université libanaise Mahmoud ABBAS et Mohamad KHALIL pour leur soutien et leur précieux conseils.

Je tiens à remercier mes proches et mes amis Abdelnaser OMAR, Abdel ZENASNI, Ahmed BAALBAKY, Ahmed KHALIL, Amer AYOUB, Ghassan MOURAD, Issa SLEIMAN, Issam KHAZMA, Layal AHMAD, Mayssara KHALIL, Mohamad DIB, Mohamed KHALIL, Omar EL CHEIKH, Samah AYOUB, Samer ZOHBI, Sabine MESSAYKE, Wissam, Samih HWALLA, Wissam CHEHADE pour leur affection maintes fois renouvelée.

Je remercie Kaldieh, Mira, Rémy, Wissam, pour tout ce qu'ils m'ont apporté tout au long de mon séjour en France et de leur soutien.

Mohammad Ziadeh, tu mérites largement ton chapitre. Merci de m'avoir si souvent écouté, encouragé et de toute l'aide que tu m'as apportée. Je suis content que tu aies trouvé un travail qui te convient à Lyon et je te souhaite beaucoup de bonheurs et de succès dans ta vie.

Sans oublier la plus belle rencontre inattendue de ma vie ma conjointe Riham DAHER la plus chère à mes yeux, avec qui j'ai partagé beaucoup d'émotions, de joies et de tendresses. Je lui exprime ici mes remerciements pour son soutien constant dans les moments difficiles de mon travail. Ces recherches n'auraient pas pu être effectuées sans ton soutien.

Finalement mes derniers remerciements, les plus chers, vont à ma grande famille, mes parents, mes sœurs et mes frères qui m'ont toujours encouragé à poursuivre mes études.

RESUME

En France, le secteur du bâtiment est responsable de 46% de la consommation d'énergie finale et de 25% des émissions de gaz à effet de serre. À ce titre, la France s'est engagée pour la baisse de la consommation d'énergie finale à l'horizon 2050 par une rénovation énergétique profonde, un déploiement de technologies favorisant l'efficacité énergétique et des sources d'énergie décarbonées pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, et de la généralisation de solutions permettant de maîtriser la consommation d'électricité.

Le retour d'expérience des bâtiments écoénergétiques met en évidence la différence de consommation d'énergie entre les prévisions et les mesures sur site, ainsi que la surchauffe en été. Selon la communauté scientifique, bien que de multiples facteurs puissent expliquer ces différences, l'occupant semble être le facteur le plus influent par ses actions sur la température intérieure de consigne et la gestion des volets et des ouvrants.

Le but de cette étude est d'analyser l'impact de comportement de l'individu réel sur un bâtiment expérimental en évaluant le confort thermique et la performance énergétique des postes consommateurs et producteurs d'énergies installés dans le bâtiment. L'objet d'étude est un bâtiment expérimental de 20 m² situé au sein de l'IUT de Nîmes, fortement instrumenté et équipé d'un ballon électro solaire, d'une pompe à chaleur air-eau réversible, d'une ventilation mécanique contrôlée double flux et de six panneaux photovoltaïques. Plusieurs techniques et protocoles sont utilisés pour contrôler l'équipement et acquérir des données. Les différents systèmes d'instrumentation et d'acquisition permettent de caractériser énergétiquement le bâtiment dans sa globalité mais aussi au niveau de chaque équipement.

Les performances énergétiques de la pompe à chaleur air-eau, de la ventilation mécanique contrôlée double flux, du ballon électro solaire et de l'installation photovoltaïque sont évaluées mensuellement et confrontées à celles données par les constructeurs.

L'analyse des consommations énergétiques du bâtiment est effectuée sur l'année complète 2020 sous les conditions climatiques locales acquises par une station météo installée sur site et d'actions particulières de l'utilisateur sur la température intérieure de consigne et la gestion des volets. Des bilans énergétiques hebdomadaires sont réalisés sur la base de scénarios de comportements simulés de l'utilisateur expert ou contreproductif.

Les simulations thermiques dynamiques du bâtiment entreprises par l'outil Pleiades, validée par les analyses in-situ, ont permis de confronter les scénarios conventionnels de la RT 2012 avec les scénarios réels tant météorologiques que comportementaux de l'utilisateur sur les consommations énergétiques annuelles du bâtiment.

Mots clés : *Comportement d'utilisateur, efficacité énergétique, consommation d'énergie, PAC air-eau, ballon électro solaire, VMC DF*

ABSTRACT

In France, the building sector is responsible for 46% of final energy consumption and 25% of greenhouse gas emissions. France is committed to reducing final energy consumption by 2050 through extensive energy renovation, the deployment of technologies that promote energy efficiency and low- carbon energy sources for heating and hot water production, and the widespread use of solutions to control electricity consumption.

ENERGY-EFFICIENT building's feedback highlights the difference in energy consumption between predictions and on-site measurements, as well as overheating in summer. According to the scientific community, although multiple factors can explain these differences, the occupant seems to be the most influential factor through his actions on the indoor temperature set point and the management of shutters and openings.

The aim of this study is analyzing the impact of the real individual behavior on an experimental building by evaluating the thermal comfort and the energy performance of the energy consuming and producing equipment's installed in the building. The object of study is an experimental building of 20 m² located within the IUT of Nîmes, strongly instrumented and equipped with an electro solar tank, a reversible water-air heat pump, a double flow controlled mechanical ventilation and six photovoltaic panels. Several techniques and protocols are used to control the equipment and acquire data. The different instrumentation and acquisition systems allow the building's energetic characterization in its globality and at the level of each equipment.

The energy performances of the air-water heat pump, double flow mechanical ventilation, solar storage tank and photovoltaic installation are evaluated monthly and compared with those given by the manufacturers.

The analysis of the building's energy consumption is carried out over the full year 2020 under local climatic conditions acquired by a weather station installed on site and on the behavior actions of interior temperature set point and shutters management. Weekly energy balances are made based on simulated scenarios of user behavior expert or counterproductive.

The building dynamic thermal simulations undertaken by the Pleiades tool, validated by the in-situ analyses, made it possible to compare the conventional scenarios of the RT 2012 with the real scenarios both meteorological and user behavioral on the building's annual energy consumption.

Keywords: User behavior, energy efficiency, energy consumption, air-water heat pump, electro solar tank, VMC DF

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| REMERCIEMENTS | 3 |
| RÉSUMÉ | 6 |
| ABSTRACT | 7 |
| TABLE DES MATIÈRES | 9 |
| TABLE DES FIGURES | 12 |
| TABLE DES TABLEAUX | 16 |
| ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES | 17 |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 21 |
| CHAPITRE 1 : ÉNERGIE ET RÉGLEMENTATION THERMIQUE | 23 |
| 1. Introduction | 25 |
| 2. Énergie en Europe | 25 |
| 2.1. Consommation énergétique en Europe..... | 25 |
| 2.2. Énergies renouvelables en Europe..... | 31 |
| 2.3. Énergie du bâtiment en Europe | 32 |
| 3. Énergie en France..... | 35 |
| 3.1. Production et consommation | 35 |
| 3.2. Énergies renouvelables en France | 37 |
| 3.3. Énergie du bâtiment en France | 38 |
| 4. Énergie en Occitanie | 40 |
| 4.1. Production et consommation | 40 |
| 4.2. Énergies renouvelables en Occitanie..... | 41 |
| 4.3. Énergies du bâtiment en Occitanie | 42 |
| 5. Historique des réglementations thermiques..... | 43 |
| 5.1. Loi Grenelle 2..... | 44 |
| 5.2. La réglementation thermique Française 2012 | 44 |
| 5.3. Label E+C- | 45 |
| 5.4. Réglementation environnementale 2020 | 47 |
| 6. Conclusion..... | 48 |
| CHAPITRE 2 : CONFORT ET COMPORTEMENT DE L'OCCUPANT DANS LE BATIMENT | 49 |

| | |
|--|-----|
| 1. Introduction | 51 |
| 2. Confort thermique | 51 |
| 2.1. Définition..... | 51 |
| 2.2. Évaluation du confort thermique | 54 |
| 2.3. Approche adaptative..... | 56 |
| 2.4. Les normes du confort thermique..... | 57 |
| 2.5. Zone de confort thermique | 58 |
| 3. Le comportement de l'occupant..... | 59 |
| 3.1. Modèle RT 2012 du comportement thermique de l'occupant | 60 |
| 3.2. Actions réelles de l'occupant dans le bâtiment | 60 |
| 4. Conclusion..... | 62 |
| CHAPITRE 3 : METHODE EXPERIMENTALE POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT DE L'USAGER. 64 | |
| 1. Introduction | 66 |
| 2. Le bâtiment expérimental | 66 |
| 2.1. Enveloppe..... | 67 |
| 3. Systèmes et équipements..... | 68 |
| 3.1. Le puits thermique..... | 69 |
| 3.2. La ventilation..... | 70 |
| 3.3. L'éclairage..... | 71 |
| 3.4. Le chauffage – Le rafraîchissement | 71 |
| 3.5. Le système photovoltaïque | 72 |
| 3.6. Le système ECS Solaire | 74 |
| 4. Système de gestion, de pilotage et de mesures..... | 77 |
| 4.1. Système KNX..... | 77 |
| 4.2. Système M-Bus | 84 |
| 4.3. Acquisition des données | 85 |
| 4.4. Données météorologiques | 88 |
| 5. Conclusion..... | 90 |
| CHAPITRE 4 : SCENARIOS D'USAGE, CONFORT ET ECHANGES ENERGETIQUES DU BATIMENT ... 91 | |
| 1. Introduction | 93 |
| 2. Le scénario météorologique | 93 |
| 3. Scénarios de l'usager..... | 96 |
| 4. Bilan annuel de confort intérieur..... | 98 |
| 4.1. Températures | 98 |
| 4.2. Température du confort intérieur..... | 98 |
| 4.3. Humidité relative intérieure..... | 99 |
| 4.4. Taux de CO2 | 101 |

| | |
|---|------------|
| 5. Bilan énergétique annuel | 102 |
| 5.1. Énergies électriques..... | 102 |
| 5.2. Énergies thermiques | 103 |
| 6. Analyse énergétique des systèmes et du bâtiment..... | 105 |
| 6.1. Panneaux solaires photovoltaïques..... | 105 |
| 6.2. Ballon ECS électro-solaire | 111 |
| 6.3. Ventilation Mécanique Contrôlée Double Flux..... | 119 |
| 6.4. Bâtiment | 123 |
| 7. Conclusion..... | 129 |
| CHAPITRE 5 : MODELISATION NUMERIQUE ET ANALYSE DES ECONOMIES D'ENERGIE | 131 |
| 1. Introduction | 133 |
| 2. Modélisation thermique du bâtiment..... | 133 |
| 2.1. Outils de simulation dynamique..... | 133 |
| 2.2. Principe de la simulation thermique dynamique (STD) | 134 |
| 2.3. Construction du modèle numérique..... | 135 |
| 2.4. Le modèle météorologique | 136 |
| 2.5. Les scénarios d'utilisateur..... | 137 |
| 3. Analyse énergétique | 137 |
| 3.1. Panneaux solaires photovoltaïques..... | 138 |
| 3.2. Ballon ECS électro-solaire | 138 |
| 3.3. Ventilation Mécanique Contrôlée Double Flux..... | 139 |
| 3.4. Impact du comportement de l'utilisateur | 140 |
| 4. Comparaisons entre scénarios réels et conventionnels..... | 143 |
| 5. Conclusion..... | 145 |
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES..... | 146 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 149 |
| ANNEXES..... | 156 |
| 6. Annexe | 157 |
| 6.1. Caractéristiques techniques des matériaux..... | 157 |
| 6.2. Caractéristiques techniques des équipements..... | 159 |
| 6.3. Plan d'installation des capteurs dans le bâtiment | 165 |

TABLE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1-1. Distance par rapport aux objectifs de 2020 et 2030 pour la consommation d'énergie primaire de l'UE-27 [5]..... | 26 |
| Figure 1-2. Distance par rapport aux objectifs de 2020 et 2030 pour la consommation finale d'énergie de l'UE-27 [5] | 27 |
| Figure 1-3. Évolution de la consommation d'énergie finale en Europe par secteur entre 2005 et 2019 [8] | 28 |
| Figure 1-4. Évolution des économies d'énergie finale en Europe depuis 2000 [11]..... | 29 |
| Figure 1-5. Évolution de la consommation d'énergie primaire de 2006 à 2019 [5] | 29 |
| Figure 1-6. Évolution de la consommation finale d'énergie du 2006 à 2019 [5] | 30 |
| Figure 1-7. Part de l'énergie provenant de sources renouvelables, 2019 (% de la consommation finale brute d'énergie) [13] | 31 |
| Figure 1-8. Consommation d'énergie des bâtiments dans l'UE en 2018 [15] | 33 |
| Figure 1-9. Evolution de l'efficacité énergétique en Europe depuis 2000 [16] | 34 |
| Figure 1-10. Part de l'énergie provenant de sources renouvelables pour le chauffage et le refroidissement, 2019 (% de la consommation finale brute d'énergie) [13]..... | 34 |
| Figure 1-11. Production d'énergie en France [17] | 35 |
| Figure 1-12. Consommation d'énergie primaire par énergie [17]..... | 36 |
| Figure 1-13. Consommation finale par secteur en France [17] | 36 |
| Figure 1-14. Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie [17] | 37 |
| Figure 1-15. Evolution de la production primaire d'énergies renouvelables par filière [18] | 38 |
| Figure 1-16. Production primaire d'énergies renouvelables par filière en 2019 [18] | 38 |
| Figure 1-17. Consommation En Mtep du secteur résidentiel en France (données corrigées des variations climatique) | 39 |
| Figure 1-18. Consommation En Mtep du secteur tertiaire en France (données corrigées des variations climatiques) | 39 |
| Figure 1-19. Évolution de la consommation d'énergie finale en Occitanie..... | 40 |
| Figure 1-20. Consommation finale des énergies par secteur en 2017 [20] | 41 |
| Figure 1-21. Mix énergétique du résidentiel/tertiaire 2017 [21] | 42 |
| Figure 1-22. Evolution de la réglementation thermique depuis 1974 | 43 |
| Figure 1-23. Cycle de vie [26]..... | 45 |
| Figure 1-24. Les 4 niveaux d'énergie de l'E+C- [28] | 46 |
| Figure 1-25. Les 2 niveaux Carbon de l'E+C- [28]..... | 46 |
| Figure 2-1. Interactions thermiques entre l'homme et son environnement..... | 52 |
| Figure 2-2. Répartition du pourcentage prévisible d'insatisfaits en fonction du vote moyen prévisible (de l'auteur) | 55 |
| Figure 2-3. Diagramme du confort [51] | 59 |
| Figure 3-1. Le bâtiment expérimental | 66 |
| Figure 3-2. Isolation des parois par 15 cm de Métisse® | 67 |
| Figure 3-3. Isolation du plafond par 20 cm de Métisse® | 68 |
| Figure 3-4. Systèmes et équipements du bâtiment | 69 |
| Figure 3-5. Installation du puits thermique en 2011..... | 69 |

| | |
|---|-----|
| Figure 3-6. Schéma du puits thermique..... | 70 |
| Figure 3-7. VMC DF du bâtiment | 71 |
| Figure 3-8. Pompe à chaleur..... | 72 |
| Figure 3-9. Schéma de l'installation du chauffage/rafraîchissement | 72 |
| Figure 3-10. Schéma de l'installation photovoltaïque..... | 73 |
| Figure 3-11. Deux panneaux solaires photovoltaïques installés sur le versant SUD de la toiture du bâtiment, d'inclinaison 45° | 73 |
| Figure 3-12. Onduleur installé dans le bâtiment | 74 |
| Figure 3-13. Système de production d'ECS..... | 74 |
| Figure 3-14. Capteur Solaire HELIO PLAN - SRD 2.3..... | 75 |
| Figure 3-15. Photo et schémas de fonctionnement du ballon ECS | 76 |
| Figure 3-16. Système KNX..... | 77 |
| Figure 3-17. Différents systèmes compatibles avec le système KNX..... | 78 |
| Figure 3-18. Capteur de température, humidité et CO2 | 78 |
| Figure 3-19. Compteur électrique Kes-plus avec un transformateur..... | 79 |
| Figure 3-20. Actionneur de volet | 80 |
| Figure 3-21. Minibox 45 – Actionneur..... | 80 |
| Figure 3-22. Capteur de températures | 81 |
| Figure 3-23. Détecteur de présence..... | 82 |
| Figure 3-24. Capteur de luminosité et température extérieure | 82 |
| Figure 3-25. Compteurs d'énergie Sharky 775 et carte M-Bus (a), Centrale d'acquisition IZAR CENTER (b)..... | 84 |
| Figure 3-26. Systèmes de communication des capteurs installés..... | 85 |
| Figure 3-27. Interface Node-Red..... | 86 |
| Figure 3-28. Plateforme de monitoring – Grafana | 87 |
| Figure 3-29. Affichages d'un tableau de bord - Grafana..... | 88 |
| Figure 3-30. Station météo de l'IUT..... | 89 |
| Figure 3-31. Mesures de températures issues des différentes stations météo et du capteur KNX | 90 |
| Figure 4-1. Zones climatiques RT 2012..... | 93 |
| Figure 4-2. Comparaison de l'évolution de la température des scénarios météo réel 2019 et conventionnel sur Nîmes..... | 94 |
| Figure 4-3. Comparaison de l'évolution de la température des scénarios météo réel 2020 et conventionnel sur Nîmes..... | 94 |
| Figure 4-4. Calendrier des scénarios 2020 | 97 |
| Figure 4-5. Evolution de la température extérieure et intérieure en 2020..... | 98 |
| Figure 4-6. Evolution de la température de confort intérieur du bâtiment en 2020 | 99 |
| Figure 4-7. Evolution de l'humidité de l'air intérieur et de l'air extérieur (station IUT) en 2020 | 99 |
| Figure 4-8. Diagramme de l'air humide 11 janvier 2020..... | 100 |
| Figure 4-9. Diagramme de l'air humide 02 février 2020..... | 100 |
| Figure 4-10. Diagramme de l'air humide 02 août 2020..... | 101 |
| Figure 4-11. Niveaux de CO2 et risques sanitaires | 101 |
| Figure 4-12. Evolution du taux de CO2 de l'air intérieur en 2020..... | 101 |
| Figure 4-13. Consommations électriques des équipements en kWh en 2020 | 102 |
| Figure 4-14. Répartition de l'énergie électrique consommée par le bâtiment pour l'année 2020..... | 103 |
| Figure 4-15. Bilan énergétique du système d'ECS du bâtiment pour l'année 2020..... | 103 |
| Figure 4-16. Énergies consommées et fournies par la PAC en 2020 | 104 |
| Figure 4-17. Consommation électrique journalière de la PAC en 2020..... | 105 |
| Figure 4-18. Énergie produite par les PV et irradiation journalière en 2020 | 105 |
| Figure 4-19. Efficacité réelle des panneaux PV 2020 | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4-20. (a) Angle zénithal, pente, angle azimutal de la surface et angle azimutal du soleil pour une surface inclinée..... | 107 |
| Figure 4-21. Évolution mensuelle du rapport R_b selon l'inclinaison des panneaux solaires..... | 107 |
| Figure 4-22. Évolution de l'irradiation moyenne quotidienne sur les deux plans inclinés à 15° et 45°..... | 109 |
| Figure 4-23. Énergie produite par les PV sur l'année 2020..... | 110 |
| Figure 4-24. Évolution de la température du ballon ECS en 2020..... | 111 |
| Figure 4-25. Volumes mensuels d'eau chaude sanitaire consommée en 2020..... | 111 |
| Figure 4-26. Énergie produite et consommée ECS en 2020..... | 112 |
| Figure 4-27. Part du solaire dans la production d'ECS..... | 112 |
| Figure 4-28. Évolution de l'efficacité brute journalière du panneau thermique..... | 113 |
| Figure 4-29. Rendement moyen mensuel du capteur thermique en 2020..... | 113 |
| Figure 4-30. Énergie mensuelle dissipée par le système de production d'ECS en 2020..... | 114 |
| Figure 4-31. Schéma de l'appoint électrique du ballon ECS solaire..... | 116 |
| Figure 4-32. Évolution de la température du ballon et périodes de mise en route de la résistance électrique pour le 2 février 2020..... | 117 |
| Figure 4-33. Nombre d'occurrence de la durée en minute de mise en fonctionnement de la résistance électrique..... | 117 |
| Figure 4-34. Sur isolation du système extérieur du ballon ECS par du métisse®..... | 118 |
| Figure 4-35. Nombre d'occurrence de fonctionnement de la résistance électrique en mai et avril 2021 selon leur durée en minute (après la sur isolation du capot extérieur)..... | 118 |
| Figure 4-36. Évolution des températures de l'air des 4 conduits de la VMC du 02 janvier au 15 janvier 2020..... | 119 |
| Figure 4-37. Efficacité brute de la VMC DF en 2020..... | 120 |
| Figure 4-38. Efficacité en % de la VMC en 2020..... | 120 |
| Figure 4-39. Fonction de by-pass de la VMC du 14 mai au 18 mai 2020..... | 121 |
| Figure 4-40. Part relative mensuelle de mise en mode by-pass de la VMC..... | 122 |
| Figure 4-41. Énergies mensuelles échangées par la VMC en 2020..... | 122 |
| Figure 4-42. Énergies mensuelles consommées par équipement et produites par les PV en 2020..... | 123 |
| Figure 4-43. Degrés heures hebdomadaires et énergies hebdomadaires fournies et consommées par la PAC pour chacun des 43 scénarios de l'année 2020..... | 125 |
| Figure 4-44. Énergie produite par la PAC selon la rigueur climatique pour chacun des scénarios d'hiver..... | 126 |
| Figure 4-45. Énergie produite par la PAC selon la rigueur climatique pour chacun des scénarios d'été..... | 128 |
| Figure 5-1. Visualisation 3D du bâtiment dans son environnement..... | 135 |
| Figure 5-2. Vue en plan..... | 135 |
| Figure 5-3. Répartition des déperditions statiques du bâtiment par élément de l'enveloppe..... | 137 |
| Figure 5-4. Production électrique photovoltaïque mensuelles simulée et réelle..... | 138 |
| Figure 5-5. Bilans mensuels simulés du ballon ECS..... | 138 |
| Figure 5-6. Évolution de la température d'eau simulée au milieu du ballon ECS..... | 139 |
| Figure 5-7. Pourcentages mensuels de mise en fonctionnement du mode by-pass de la VMC simulés et réels pour les scénarios comportementaux et météorologiques réels pour l'année 2020..... | 139 |
| Figure 5-8. Énergie journalière simulée fournie en 2020 (scénarios et météo réels)..... | 140 |
| Figure 5-9. Énergie hebdomadaire produite par la PAC selon la rigueur climatique pour chacun des scénarios d'hiver (simulation Pleiades)..... | 142 |
| Figure 5-10. Énergie hebdomadaire produite par la PAC selon la rigueur climatique pour chacun des scénarios d'été (simulation Pleiades)..... | 142 |
| Figure 6-1. Caractéristiques du métisse®..... | 157 |
| Figure 6-2. Caractéristiques du pare-vapeur..... | 158 |

| | |
|--|-----|
| Figure 6-3. Caractéristiques techniques de la VMC DF..... | 159 |
| Figure 6-4. Caractéristiques techniques de la pompe à chaleur | 161 |
| Figure 6-5. Caractéristiques techniques des panneaux photovoltaïques | 162 |
| Figure 6-6. Caractéristiques techniques du panneau thermique | 163 |
| Figure 6-7. Caractéristiques techniques du ballon d'ECS | 164 |
| Figure 6-8. Plan d'installation des capteurs | 165 |

TABLE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1-1. Part de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, 2019 (% de la consommation finale brute d'énergie) [13] | 32 |
| Tableau 2-1. Echelle de perception thermique ASHRAE | 55 |
| Tableau 2-2. Normes du confort thermique | 58 |
| Tableau 3-1 : Données géographiques du lieu | 67 |
| Tableau 3-2. Caractéristiques de la pompe à chaleur en mode chauffage et rafraîchissement..... | 72 |
| Tableau 3-3. Caractéristiques du capteur solaire SRD 2.3 | 75 |
| Tableau 3-4. Caractéristiques du ballon ECS..... | 76 |
| Tableau 3-5. Caractéristiques de la station météo de l'IUT | 89 |
| Tableau 4-1. DJU chauffagiste réels 2019, 2020 et issus de la météo conventionnelle [68] | 95 |
| Tableau 4-2. DJU climaticien réels base 18 ° C en 2019, 2020 et issus de la météo conventionnelle.. | 95 |
| Tableau 4-3. Calcul de l'irradiation sur un plan incliné à 15° et 45° | 109 |
| Tableau 4-4. Evolution de la constante de refroidissement du ballon sur les deux premières semaines de décembre..... | 115 |
| Tableau 4-5. Constante moyenne mensuelle de dissipation du système ECS solaire..... | 115 |
| Tableau 4-6. Scénarios hebdomadaires de l'occupant en 2020..... | 124 |
| Tableau 4-7. Description des 12 scénarios hebdomadaires en mode chauffage..... | 126 |
| Tableau 4-8. Description des 14 scénarios hebdomadaires en mode rafraîchissement | 127 |
| Tableau 5-1. Compositions des parois du bâtiment..... | 136 |
| Tableau 5-2. Scénarios du comportement de l'utilisateur simulé | 141 |
| Tableau 5-3. Résultats des quatre simulations issus de l'outil Pleiades et mesures réelles par poste . | 143 |

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

| Abréviation | Description |
|--------------------|---|
| ASHRAE | American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers |
| BBC | Bâtiment Basse Consommation |
| BEPOS | Bâtiment à Énergie Positive |
| DTU | Document technique unifié |
| E+C- | Sigle du Label de la réglementation environnementale 2020 |
| ECS | Eau chaude sanitaire |
| IUT | Institut universitaire de technologie |
| PAC | Pompe à chaleur |
| PACTE | Programme d'Actions Concerté sur les Technologies Énergétiques liées à l'eau chaude sanitaire |
| pp | Point de pourcentage |
| PV | Panneau photovoltaïque |
| RE | Réglementation environnementale |
| REPOS | Région à énergie positive |
| RT | Réglementation thermique |
| STD | Simulation de Thermique Dynamique |
| UE | Union européenne |
| VMC DF | Ventilation Mécanique Contrôlée double flux |

| Symbole | Unité | Description |
|----------------|------------------|--|
| C | W/m ² | Échanges de chaleur par convection |
| Cd | Wh/(l.j.K) | Coefficient de dissipation énergétique |
| Ceau | Wh/(l.K) | Chaleur massique de l'eau |

| | | |
|-------------------|-------------------------|---|
| COP | | Coefficient de performance |
| Cr | Wh/(l.j.K) | Coefficient de refroidissement |
| DH _{heb} | °C.h | Degré-Heures hebdomadaire |
| DJU18 | °C.j | Degré-Jours Unifiés base 18 |
| dt | kh | pas d'intégration sur la durée |
| E | kWh | Energie |
| EER | | Energy Efficiency Ratio (Taux de rendement énergétique saisonnier) |
| Eres | W/m ² | Échanges thermiques par évaporation respiratoire |
| Esk | W/m ² | Échanges de chaleur par évaporation de la sueur |
| φ | ° | Latitude |
| H | W/K | Coefficient de déperdition thermique |
| Hp | W/K | Coefficient de déperdition thermique par les parois |
| Hv | W/K | Coefficient de déperdition thermique par renouvellement d'air |
| HR | % | Humidité relative |
| hr | W/(m ² °C) | Coefficient de transfert thermique par rayonnement. |
| hc | W/(m ² °C) | Coefficient de transfert thermique par convection |
| L | W/m ² | Écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et chaleur cédée |
| M | W/m ² ou met | Activité métabolique |
| ODEX | | Indice d'efficacité énergétique |
| PMV | - | Predicted Mean Vote ou Vote Moyen Prévisible |
| PPD | % | Predicted Percent Dissatisfied ou Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits |
| Qres | W/m ² | Flux de chaleur échangé par la respiration |
| Qsk | W/m ² | Flux de chaleur échangé à la surface de la peau |
| R | W/m ² | Échanges de chaleur par rayonnement |
| S | W/m ² | Chaleur stockée |
| Scr | W/m ² | Chaleur stockée dans le corps |
| Scr | W/m ² | Chaleur stockée dans le corps |
| Ssk | W/m ² | Chaleur stockée dans la peau |
| Ta | °C | Température de l'air ambiant. |
| Tc | °C | Température intérieure de confort optimal |

| | | |
|---------------------------|-------------------------|--|
| T_{C+3} | °C | Température de confort + 3 °C |
| T_{C-3} | °C | Température de confort – 3 °C |
| T_e | °C | Température extérieure |
| T_i | °C | Température intérieure |
| T_{op} | °C | Température opérative intérieure |
| TRM | °C | Température radiante moyenne |
| TRM7 | °C | Température extérieure en moyenne glissante journalière sur 7 jours |
| U | W/(m ² .°C) | Coefficient de transmission thermique d'une parois |
| V_s | l | Volume de stockage |
| W | W/m ² ou met | Puissance fournie à l'extérieur |
| $\omega's$ | ° | Angle horaire au lever du soleil |
| ω_s | ° | Angle horaire au lever du soleil |
| β | ° | Angle entre le plan de la surface considérée et l'horizontale |
| δ | ° | Déclinaison, la position angulaire du soleil à midi solaire |
| η | % | Rendement |
| $\theta -1$ à $\theta -n$ | °C | Température moyenne journalière des jours J-1 à J-n |
| G_{sc} | W/m ² | Constante solaire |
| K_T | | Indice de clarté moyen mensuel |
| Δt | h | Durée |
| θ_{amb} | °C | Température du local où est situé le stockage, prise égale à 20 (°C) |
| θ_{ecs} | °C | Température initiale de stockage d'ECS |
| θ_{ecs0} | °C | Température de stockage d'ECS, voisine de 65 °C |
| ρ_g | | albédo |
| ε | % | Efficacité |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'épuisement des réserves d'énergie causé par la production intensive, l'approbation des lois et des décrets sur la protection de l'environnement dans la plupart des pays / régions et la hausse du prix du pétrole par baril sont les principaux facteurs qui amènent les gens à s'en rendre compte. Il est nécessaire d'utiliser l'énergie à bon escient.

En Europe, les secteurs public et privé sont conscients des avantages de la mise en œuvre de politiques d'efficacité énergétique dans les secteurs des transports, de l'industrie et du bâtiment (résidentiel et tertiaire).

Le secteur du bâtiment est responsable de 46% de la consommation d'énergie finale et de 25% des émissions de gaz à effet de serre en France.

Cette étude de recherche s'inscrit dans les thématiques relevant du programme de recherche de l'équipe Structures Innovantes, Géomatériaux, Ecoconstruction (SIGECO) au laboratoire de mécanique et génie civil de Montpellier. Ces travaux de recherches portent sur l'analyse du comportement énergétique d'un petit bâtiment expérimental de l'IUT de Nîmes et des efficacités des systèmes installés.

Le travail effectué consiste à simuler l'action de l'utilisateur sur le bâtiment selon le type d'occupant tel qu'identifié lors de l'étude de C. BATIER [1]. Le comportement de l'utilisateur est simulé en jouant exclusivement sur la consigne de température intérieure, la position des volets et la consommation d'eau chaude sanitaire. Pour ce faire, les 18 premiers mois de ma thèse ont été consacrés à l'installation, à la mise en service et l'instrumentation de l'ensemble des équipements et au développement des outils d'acquisition/visualisation des mesures. Des recherches menées sur les différents systèmes d'instrumentation et de pilotage nous ont conduits à choisir le système KNX pour lequel une grande variété des capteurs est adaptée. J'ai effectué une formation certifiée KNX nécessaire pour l'implantation efficace de ces capteurs dans le bâtiment. Pour les systèmes thermiques, j'ai choisi d'installer des compteurs thermiques connectés par le système M-Bus pour la relève automatique des mesures. Avec Node-Red, j'ai pu développer des codes et des plateformes pour se connecter à KNX, au M-Bus et à la station météo avec des fréquences de relève définies pour l'analyse souhaitée. Les données sont stockées sur la database Influxdb libre de droit et compatible avec l'outil Grafana, plateforme de visualisation personnalisable.

Cette contribution est structurée en cinq chapitres :

Le premier chapitre est un aperçu global des bilans énergétiques de l'Union Européenne, de la France et de l'Occitanie. Il contient en premier niveau, un bilan de production et de consommation d'énergie primaire et finale des 28 pays de l'UE, l'efficacité énergétique de l'UE. Puis il décrit la part d'énergies renouvelables dans la production et la consommation de l'UE en montrant la distance à l'objectif 20% ainsi que la part du secteur de bâtiment de la consommation finale. En deuxième niveau, il décrit le bilan énergétique de la France en termes de production et consommations primaire et finale ; ensuite, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale de l'hexagone puis la part de la consommation

du secteur du bâtiment. En troisième niveau, le bilan des énergies de la région Occitanie est présenté. Pour terminer, l'historique des Règlements Thermiques (RT) françaises est décrit à partir de la première réglementation thermique de 1974 jusqu'à la réglementation environnementale 2020 (RE 2020) en passant par la RT 2012 et les labels.

Le confort thermique est présenté dans le deuxième chapitre en prenant en compte les différents modèles d'évaluation. Ce chapitre expose aussi le comportement de l'occupant et son influence sur le confort et les performances énergétiques du bâtiment.

Un bâtiment expérimental est le centre des travaux de recherche de cette étude. Le chapitre trois développe la description de ce bâtiment qui se situe au sein de l'IUT de Nîmes, dans un climat méditerranéen. Le bâtiment est réparti en deux pièces : une pièce de vie et un local technique qui regroupe les équipements tels que la ventilation mécanique contrôlée double flux (VMC DF) et le ballon d'eau chaude solaire. Le système de production d'eau chaude sanitaire dans le bâtiment est constitué d'un capteur solaire thermique relié à un chauffe-eau électro solaire. La ventilation associe un puits thermique à la VMC double flux. Des systèmes de pilotage et de communication dédiés aux bâtiments connectés sont installés afin de simuler un comportement d'individu en termes de gestion des volets, de consommation d'ECS et de température de consigne. Ces systèmes sont connectés au réseau informatique de l'IUT pour une sauvegarde automatique des mesures (d'énergie et de qualité de l'air intérieur). Une station météorologique professionnelle est installée sur le toit terrasse de l'IUT afin d'acquérir des caractéristiques réelles de la météorologie du lieu.

Le chapitre quatre décrit l'étude du bâtiment en 2020. Il représente le scénario météorologique de Nîmes en 2020, les scénarios réels du comportement de l'occupant simulé sur les équipements (PAC, volets, ECS) du bâtiment. Des évolutions annuelles de la température, de l'humidité et du taux de CO₂ de l'air intérieur sont représentées pour qualifier l'évolution du confort intérieur. Un bilan énergétique global du bâtiment est effectué suivi par des analyses énergétiques des systèmes (PV, ballon d'eau chaude sanitaire).

Le chapitre cinq contient une modélisation de ce bâtiment par le logiciel Pleiades. La modélisation prend en compte les systèmes énergétiques installés dans le bâtiment, les matériaux de construction de l'enveloppe. Cette modélisation est basée sur les données réelles de chaque élément et la météorologie de Nîmes. Une étude comparative des quatre simulations thermiques dynamiques tenant compte de deux scénarios comportementaux de l'individu (conventionnel et réel) et de deux scénarios météorologiques (conventionnel et Nîmes 2020) est réalisée. Ces quatre simulations sont comparées ainsi aux mesures énergétiques réelles (scénarios et météo réels), ce qui permet de qualifier les écarts de consommations énergétiques entre les simulations thermiques dynamiques obtenues selon les scénarios comportementaux de l'individu et météorologique avec les consommations réelles observées. Cette étude est clôturée par une discussion des résultats de simulation présentés.

Enfin, une conclusion qui résume les principaux résultats obtenus au cours de la thèse. Elle développe quelques pistes de réflexions supplémentaires dans les perspectives de ce travail.

CHAPITRE 1 : ÉNERGIE ET RÉGLEMENTATION THERMIQUE

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 25 |
| 2. Énergie en Europe | 25 |
| 2.1. Consommation énergétique en Europe..... | 25 |
| 2.2. Énergies renouvelables en Europe..... | 31 |
| 2.3. Énergie du bâtiment en Europe | 32 |
| 3. Énergie en France..... | 35 |
| 3.1. Production et consommation | 35 |
| 3.2. Énergies renouvelables en France | 37 |
| 3.3. Énergie du bâtiment en France | 38 |
| 4. Énergie en Occitanie | 40 |
| 4.1. Production et consommation | 40 |
| 4.2. Énergies renouvelables en Occitanie..... | 41 |
| 4.3. Énergies du bâtiment en Occitanie | 42 |
| 5. Historique des réglementations thermiques..... | 43 |
| 5.1. Loi Grenelle 2..... | 44 |
| 5.2. La réglementation thermique Française 2012 | 44 |
| 5.3. Label E+C- | 45 |
| 5.4. Réglementation environnementale 2020 | 47 |
| 6. Conclusion..... | 48 |

1. Introduction

Une analyse globale sur les évolutions des énergies produites et consommées est tout d'abord présentée au niveau de l'Union Européenne sous couvert des directives européenne sur l'énergie. Puis, cette analyse est portée au niveau de l'hexagone et finalement au niveau de la région Occitanie. L'évolution de la réglementation thermique en France est présentée depuis la RT 2005 jusqu'aux perspectives de la nouvelle réglementation environnementale RE 2020.

2. Énergie en Europe

L'Union européenne (UE) comprend la Belgique, la Bulgarie, la Tchéquie, le Danemark, l'Allemagne, l'Estonie, l'Irlande, la Grèce, l'Espagne, la France, la Croatie, l'Italie, Chypre, la Lettonie, la Lituanie, le Luxembourg, la Hongrie, Malte, les Pays-Bas, l'Autriche, la Pologne, le Portugal, la Roumanie, la Slovaquie, la Finlande, la Suède.

Le troisième plus grand consommateur d'énergie du monde en volume est l'Union européenne après la Chine et les Etats-Unis, du fait de la situation raisonnable de sa population, du niveau de développement économique et industriel et des efforts environnementaux.

2.1. Consommation énergétique en Europe

Le transport est le secteur le plus consommateur d'énergie en Europe, devant le bâtiment, l'industrie et les services. L'Europe importe environ 54% de son énergie : environ 40% de son charbon, 60% de son gaz et 80% de son pétrole pour répondre aux besoins. En effet, le continent ne dispose que de faibles ressources en hydrocarbures et ne produit que peu d'énergie. Les pays producteurs sont le Royaume-Uni (pétrole), la France (nucléaire), ou encore le Danemark (énergies renouvelables, notamment éolien).

L'Europe a ainsi une forte dépendance énergétique vis-à-vis du reste du monde, en particulier de la Russie et du Moyen-Orient. Le degré de cette dépendance varie d'un pays à l'autre. Du fait des énergies renouvelables qu'ils produisent, cette proportion est inférieure à 25% au Danemark, en Estonie et en Roumanie. En France et en Pologne, l'énergie nucléaire et le charbon sont les principaux composants de l'indépendance énergétique et au Royaume-Uni ce sont le pétrole et le gaz naturel. Cette dépendance est de 50% en Allemagne, de 75% en Espagne et en Grèce. En Irlande ou en Italie, ce ratio dépasse 75%.

L'UE a publié des plans ambitieux dans le cadre d'un Green Deal visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 50 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici à 2030 et à atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050 [2]. Pour atteindre ces objectifs, il faudra mettre en œuvre diverses stratégies telles que des investissements dans les technologies vertes, des innovations industrielles, des économies circulaires, la décarbonisation des transports et de la production d'énergie et la modernisation du parc immobilier existant, dont une grande partie est inefficace sur le plan énergétique [2], [3].

Depuis les années 2000, diverses politiques en Europe [4] ont été mises en place pour réduire la consommation finale d'énergie. L'un des cinq objectifs ambitieux de l'Union européenne concernant la stratégie européenne 2020 se concentre sur le climat et l'énergie, dont l'efficacité énergétique est au cœur de cette stratégie pour une croissance intelligente, durable et inclusive.

L'UE s'est fixée trois objectifs majeurs fondés sur le changement climatique et la durabilité énergétique pour 2020 [4], dits "20-20-20" :

- Réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux niveaux de 1990 ;
- 20% de la part de la consommation d'énergie de l'UE produite à partir de ressources renouvelables ;
- Amélioration de 20% de l'efficacité énergétique¹ par rapport à la consommation d'énergie primaire de l'UE.

À l'horizon de 2030 [4], ces objectifs deviennent :

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 % (par rapport aux niveaux de 1990) ;
- Porter la part des énergies renouvelables à au moins 32 % ;
- Améliorer l'efficacité énergétique d'au moins 32,5 %.

Au fil des ans, la consommation d'énergie primaire a fluctué car les besoins en énergie sont influencés par l'évolution économique, les changements structurels de l'industrie, la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique et également la situation météorologique spécifique (comme les hivers froids par rapport aux hivers chauds). Après avoir augmenté de 4,0% entre 2014 et 2017 (trois années consécutives d'augmentation), la consommation d'énergie primaire a diminué en 2018 et 2019 (au total de 2,4%). Depuis son pic en 2006, elle a diminué de 10,5%. L'écart entre le niveau réel de la consommation d'énergie primaire et le niveau cible en 2020 était de 15,1% en 2006, 1,5% en 2014 et il était de 3,0% en 2019. La distance par rapport à l'objectif de 2030 était de 19,9% en 2019 (figure 1-1).

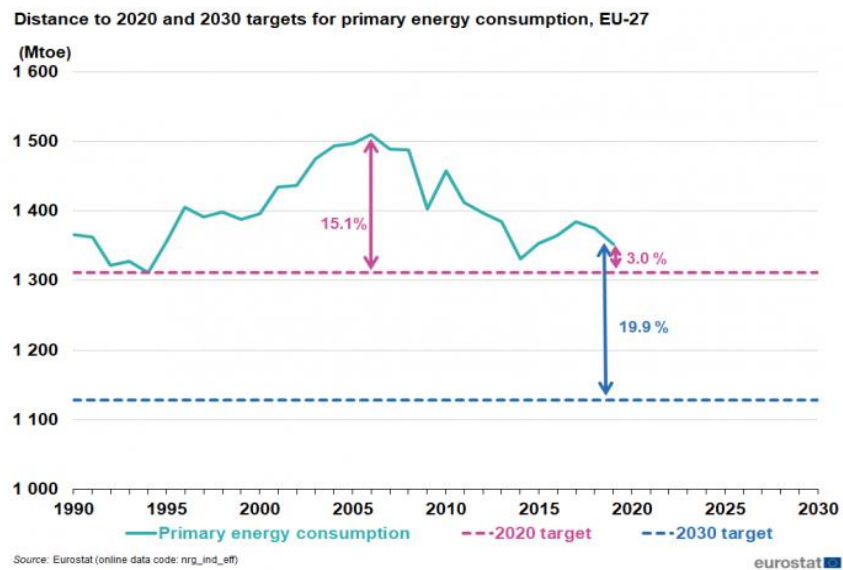


Figure 1-1. Distance par rapport aux objectifs de 2020 et 2030 pour la consommation d'énergie primaire de l'UE-27 [5]

Après quatre années consécutives d'augmentation (de 2014 à 2018), la consommation finale d'énergie (figure 1-2) a diminué en 2019.

¹ Efficacité énergétique : rapport en pourcentage de l'énergie produite à l'apport énergétique nécessaire pour la produire.

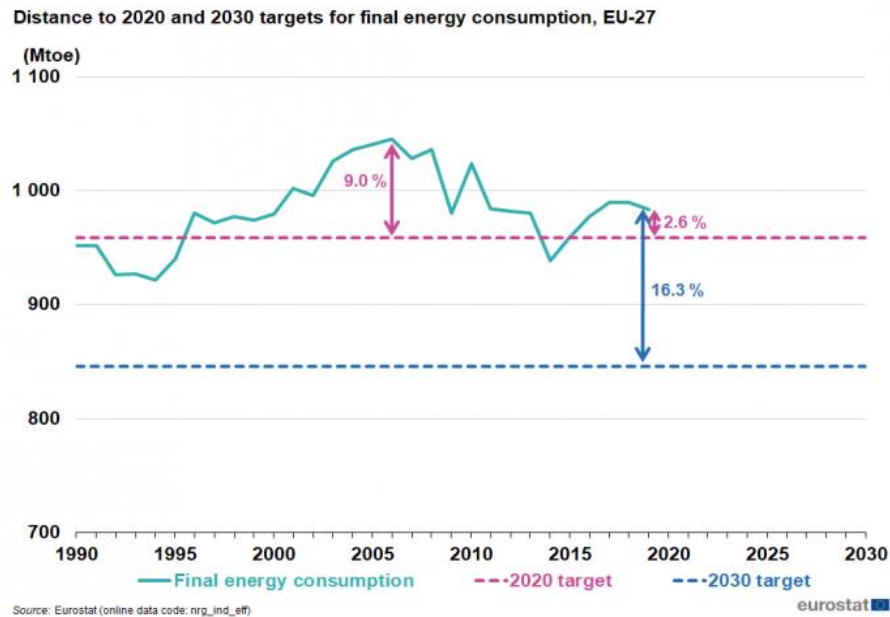


Figure 1-2. Distance par rapport aux objectifs de 2020 et 2030 pour la consommation finale d'énergie de l'UE-27 [5]

Alors qu'en 2014, la consommation d'énergie finale était inférieure de 2,1% à l'objectif de 2020, en 2019, elle était supérieure de 2,6% à l'objectif de 2020. La distance par rapport à l'objectif de 2030 était de 16,3% en 2019. La consommation d'énergie finale a atteint un pic en 2006 et son niveau en 2019 était inférieur de 5,9% à ce pic.

La consommation intérieure brute d'énergie d'un pays est évaluée en tonnes équivalent pétrole par an. Elle représente « la quantité d'énergie nécessaire pour satisfaire la demande intérieure » du pays [6]. Elle se calcule en utilisant l'énergie primaire – soit l'énergie produite et importée dans chaque pays avant d'être transformée pour son utilisation finale – minorée des exportations.

En 2017, la consommation d'énergie en Europe était d'environ 1700 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep), avec environ 510 millions de résidents, tandis que celle des États-Unis était d'environ 2200 Mtep pour environ 325 millions de résidents, soit un ratio de 3,3 tep/hbt pour l'Europe contre 6,8 tep/hbt [7]. En 2017, la consommation énergétique finale dans les 28 États membres de l'UE a augmenté pour la première fois en 7 ans au-dessus de la trajectoire indicative fixée par l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) pour suivre les progrès vers les objectifs d'efficacité énergétique de 2020.

La consommation finale d'énergie de l'UE entre 2007 et 2018 des différents secteurs est présentée dans la figure 1-3. La consommation finale d'énergie de l'UE du secteur de l'industrie a diminué globalement de 12,0%. Le secteur des transports a subi une baisse des consommations d'énergie de 1,7%, tandis que celui des bâtiments de seulement 1,5%. En revanche, la consommation finale d'énergie dans le secteur des services a augmenté au cours de la période considérée de 6,1%.

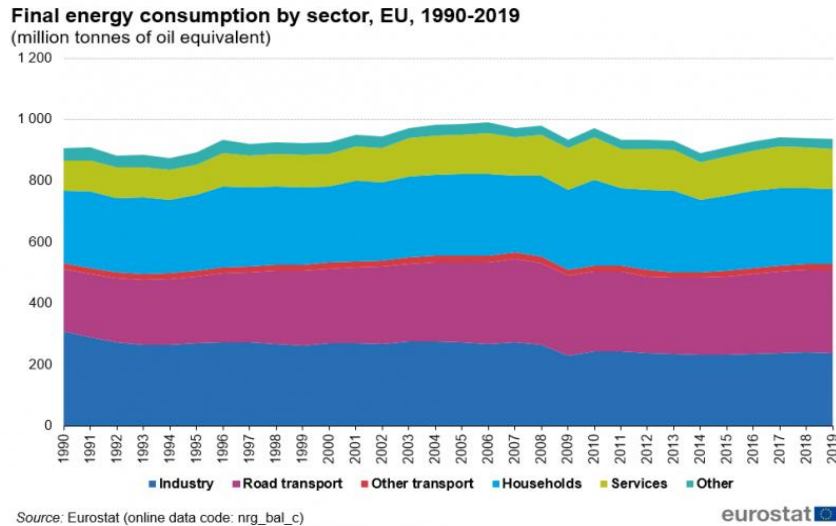


Figure 1-3. Évolution de la consommation d'énergie finale en Europe par secteur entre 2005 et 2019 [8]

L'analyse de la consommation de l'énergie finale dans l'UE en 2018 montre trois catégories dominantes : les transports (30,5%), les ménages (26,1%) et l'industrie (25,8%).

En 2017, la Commission européenne a mis à jour la directive sur l'efficacité énergétique, comprenant l'objectif de 30% d'efficacité énergétique pour 2030 avec les mesures nécessaires pour y parvenir. Le Conseil de l'énergie de juin 2017 a approuvé une proposition de directive révisée sur l'efficacité énergétique dont les principaux éléments seront un objectif global d'efficacité énergétique de 30% et un objectif d'économies d'énergie obligatoire de 1,5%, diminuant de 1,0% pour la période 2026-2030, sauf si l'examen à mi-parcours en 2024 conclut que l'UE n'est pas en voie d'atteindre ses objectifs.

L'efficacité énergétique peut être évaluée à différents niveaux, de l'intensité énergétique à l'échelle de l'économie et du secteur aux unités d'activités individuelles, comme la cuisson. L'Agence internationale de l'énergie a produit des lignes politiques directrices pour l'élaboration et l'utilisation d'indicateurs d'efficacité énergétique.

Au niveau européen, le projet ODYSSEE-MURE effectue un suivi complet des tendances en matière de consommation et d'efficacité énergétiques, ainsi qu'une évaluation des mesures politiques d'efficacité énergétique par secteur. Le projet ODYSSEE-MURE [4] a défini un indice appelé ODEX [9], [10] pour mesurer les progrès de l'efficacité énergétique par secteur (industrie, transport, bâtiment) et pour l'ensemble de l'économie, par rapport à une année de référence (année 2000).

Le système de pondération utilisé pour calculer l'ODEX a été défini de telle sorte qu'il soit égal à un taux d'économie d'énergie, c'est-à-dire le rapport entre la consommation énergétique réelle (E) du secteur au cours de l'année t et la consommation énergétique réelle (E) sans l'économie d'énergie (ES) réalisée par le progrès de l'efficacité du secteur considéré vis à vis d'une année de référence :

$$ODEX = \frac{E}{E+ES} * 100 \quad [\text{Éq. 1-1}]$$

L'efficacité énergétique de l'ensemble des secteurs [11] (courbe "Total" de la figure 1-4) s'est améliorée de 1,2%/an entre 2000 et 2018, avec un léger ralentissement depuis 2010 (1,1%/an contre 1,4%/an avant 2007).

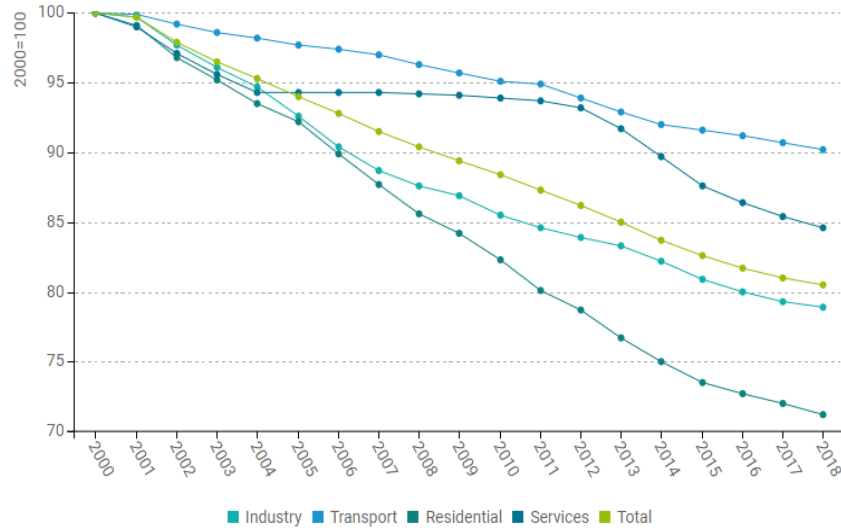


Figure 1-4. Évolution des économies d'énergie finale en Europe depuis 2000 [11]

En 2006, la consommation d'énergie primaire et finale de l'UE a atteint un pic. Entre 2006 et 2019, la consommation d'énergie primaire, présentée figure 1-5, n'a augmenté qu'en Pologne (6,3%). Dans tous les autres États membres, elle a diminué, les baisses les plus importantes ayant été enregistrées en Lituanie (- 20,5%), en Grèce (-19,9%), au Danemark (-19,3%) et en Italie (-18,5%).

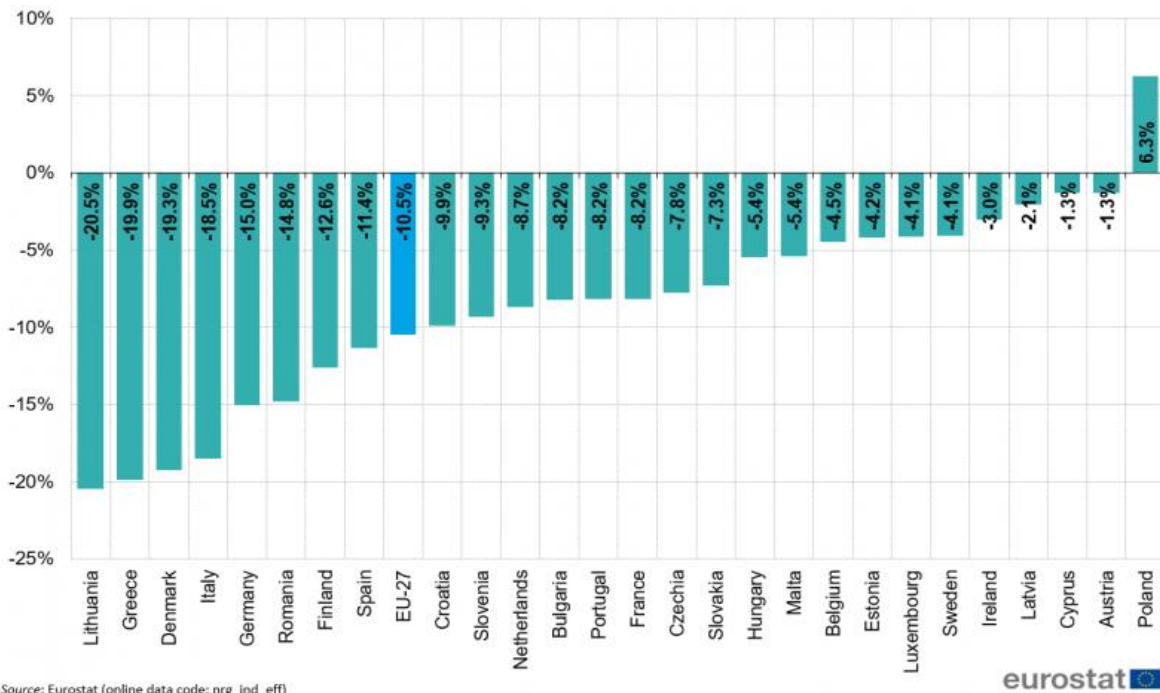


Figure 1-5. Évolution de la consommation d'énergie primaire de 2006 à 2019 [5]

La consommation finale d'énergie a augmenté dans sept États membres. Les augmentations les plus significatives ont été observées à Malte (50,0%), en Pologne (15,9%) et en Lituanie (12,7%), tandis que les plus fortes baisses ont été réalisées en Grèce (-25,1%), en Italie (-14,9%) et en Espagne (- 9,9%).

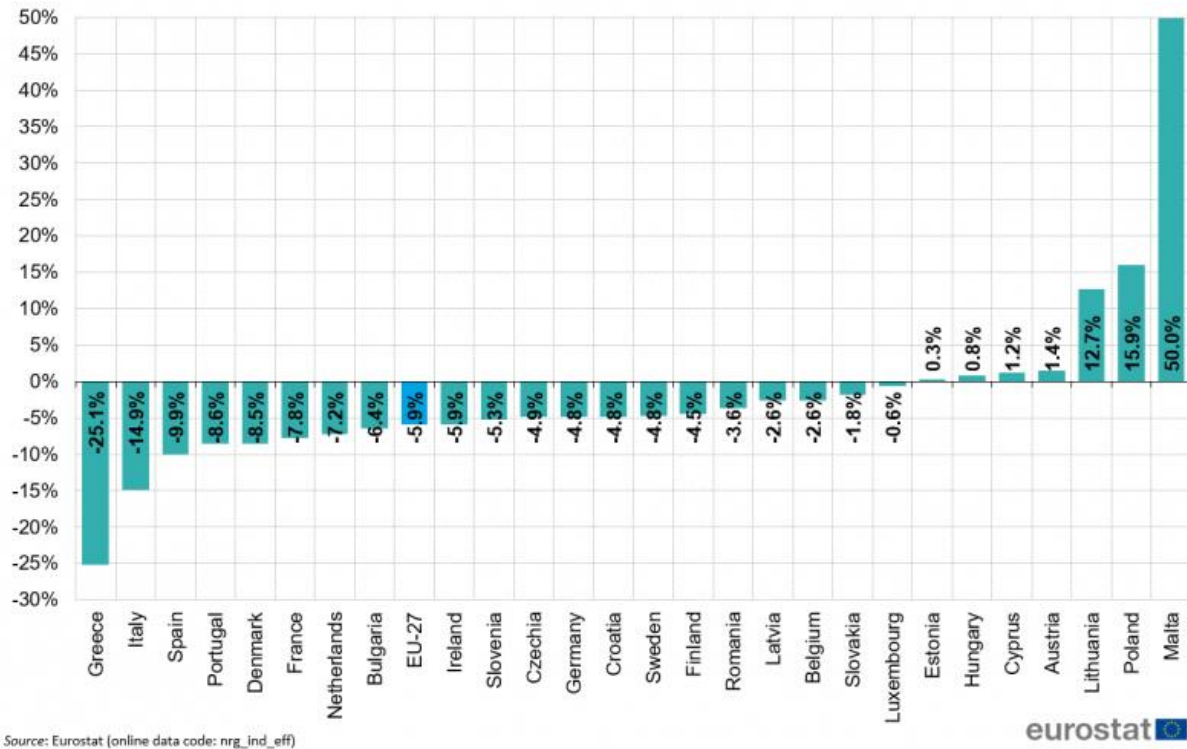


Figure 1-6. Évolution de la consommation finale d'énergie du 2006 à 2019 [5]

Les tendances divergentes entre la consommation d'énergie primaire et finale sont souvent le résultat de changements fondamentaux dans le système énergétique, notamment le passage de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire (faible rendement) à l'énergie éolienne et solaire PV (rendement de 100%, selon la méthode utilisée).

Les directives 2006/32/CE et 2012/27/EU [4] ont introduit le cadre d'un plan d'action national pour l'efficacité énergétique (PNAEE) que chaque État membre a dû adopter afin d'atteindre l'objectif de 9% d'économies d'énergie sur une période de 9 ans, de 2008 à 2016. Afin d'atteindre l'objectif de l'UE 2020 et compte tenu des faibles progrès des États membres dans la mise en œuvre des politiques d'efficacité énergétique, la Commission a proposé le 22 juin 2011 une nouvelle directive visant à intensifier les efforts des États membres pour utiliser l'énergie plus efficacement à tous les stades de la chaîne énergétique de la transformation de l'énergie et de sa distribution à sa consommation finale. Il s'agit de la directive sur l'efficacité énergétique (DEE) qui a été adoptée en décembre 2012 et qui a abrogé la précédente DEE.

La directive sur l'efficacité énergétique contient un ensemble de mesures contraignantes telles que : l'obligation légale d'établir des programmes d'économie d'énergie dans les États membres, l'obligation pour le secteur public de montrer l'exemple, les audits énergétiques, les services énergétiques, les fonds pour l'efficacité énergétique, la cogénération efficace, les informations relatives aux compteurs et à la facturation, le comportement des consommateurs, etc.

L'article 3 de la directive 2012/27/EU [4] prévoit que la consommation énergétique de l'Union en 2020 ne doit pas dépasser 1483 Mtep d'énergie primaire ou 1086 Mtep d'énergie finale. Cet objectif a déjà été atteint pour la consommation d'énergie finale (1084 Mtep de consommation d'énergie finale en 2015) ; pour la consommation d'énergie primaire, l'UE est sur la voie d'atteindre l'objectif de réduction de la consommation d'énergie primaire à 1483 Mtep malgré l'augmentation en 2015 (1530 Mtep d'énergie primaire consommée correspondant à un écart de 3,2% à l'objectif – figure 1-1).

Une autre action politique importante en matière d'efficacité énergétique au niveau de l'UE a été l'introduction des exigences minimales d'efficacité pour les produits. La directive 2009/125/EC [4] sur l'écoconception est une législation-cadre qui permet l'introduction d'exigences en matière d'efficacité énergétique pour les produits liés à l'énergie tels que les appareils ménagers, les lampes, l'électronique grand public, les TIC, l'équipement, etc. Depuis l'introduction de la première directive sur l'écoconception, un certain nombre de règlements d'application ont été adoptés, introduisant des exigences d'efficacité pour les appareils domestiques (réfrigérateurs, congélateurs, machines à laver, lave-vaisselles, etc.), mais aussi lampes, téléviseurs, climatiseurs, chauffages et chauffe-eaux, transformateurs de puissance et unités de ventilation, entre autres. Les exigences en matière de rendement ont été complétées par l'utilisation obligatoire de l'étiquetage énergétique, comme le prévoit la directive. L'étiquetage énergétique des équipements résidentiels, introduit en 1992 (en 1994 pour les réfrigérateurs), a contribué à élargir le marché des appareils efficaces.

2.2. Énergies renouvelables en Europe

L'UE cherche à ce que 20% de sa consommation finale brute d'énergie provienne de sources renouvelables en 2020. Cet objectif est réparti entre les États membres de l'UE avec des plans d'action nationaux conçus pour tracer une voie pour le développement des énergies renouvelables dans chacun des États membres. La figure 1-7 présente les dernières données disponibles concernant la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie et les objectifs qui ont été fixés pour 2020. La part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie s'élevait à 19,7% dans l'UE-27 en 2019, contre 9,6% en 2004.

L'énergie électrique produite à partir de sources renouvelables a dépassé pour la première fois en Europe celle d'origine fossile en 2020 : le solaire, l'hydraulique et l'éolien ont fourni 38% de l'énergie des 27 États membres, contre 34% en 2019 [12]. Il est donc probable que l'objectif de 20% de consommation finale brute d'énergie issue des énergies renouvelables soit ainsi atteint.

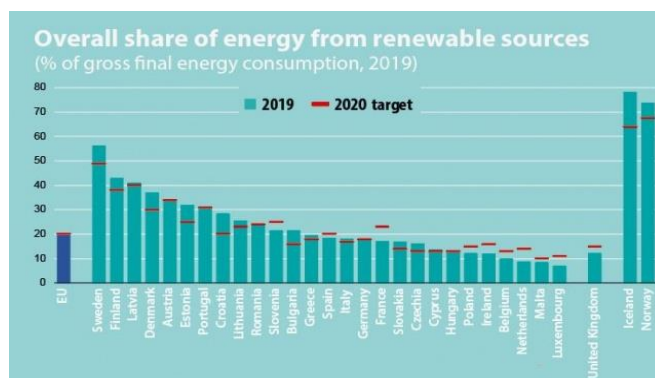


Figure 1-7. Part de l'énergie provenant de sources renouvelables, 2019 (% de la consommation finale brute d'énergie) [13]

Cette évolution positive est due aux objectifs juridiquement contraignants d'augmentation de la part de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, adoptés par la directive 2009/28/CE. Même si l'UE dans son ensemble a atteint ses objectifs de 2020, certains États membres devront faire des efforts supplémentaires pour respecter leurs obligations en ce qui concerne les deux principaux objectifs : la part globale de l'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie (figure 1-7, tableau 1-1) et la part spécifique de l'énergie produite à partir de sources renouvelables dans les transports. La part d'énergies renouvelables de chaque pays de l'UE européen est présenté dans le tableau 1-1, ainsi que le pourcentage de l'objectif de 20% :

| | 2004 | 2019 | 2020 target |
|----------------|------|------|-------------|
| EU-27 | 9.6 | 19.7 | 20 |
| EU-28 | 8.6 | 18.9 | 20 |
| Belgium | 1.9 | 9.9 | 13.0 |
| Bulgaria | 9.2 | 21.6 | 16.0 |
| Czechia | 6.8 | 16.2 | 13.0 |
| Denmark | 14.8 | 37.2 | 30.0 |
| Germany | 6.2 | 17.4 | 18.0 |
| Estonia | 18.4 | 31.9 | 25.0 |
| Ireland | 2.4 | 12.0 | 16.0 |
| Greece | 7.2 | 19.7 | 18.0 |
| Spain | 8.3 | 18.4 | 20.0 |
| France | 9.5 | 17.2 | 23.0 |
| Croatia | 23.4 | 28.5 | 20.0 |
| Italy | 6.3 | 18.2 | 17.0 |
| Cyprus | 3.1 | 13.8 | 13.0 |
| Latvia | 32.8 | 41.0 | 40.0 |
| Lithuania | 17.2 | 25.5 | 23.0 |
| Luxembourg | 0.9 | 7.0 | 11.0 |
| Hungary | 4.4 | 12.6 | 13.0 |
| Malta | 0.1 | 8.5 | 10.0 |
| Netherlands | 2.0 | 8.8 | 14.0 |
| Austria | 22.6 | 33.6 | 34.0 |
| Poland | 6.9 | 12.2 | 15.0 |
| Portugal | 19.2 | 30.6 | 31.0 |
| Romania | 16.8 | 24.3 | 24.0 |
| Slovenia | 18.4 | 21.7 | 25.0 |
| Slovakia | 6.4 | 16.9 | 14.0 |
| Finland | 29.2 | 43.1 | 38.0 |
| Sweden | 38.7 | 56.4 | 49.0 |
| United Kingdom | 1.1 | 12.3 | 15.0 |
| Iceland | 58.8 | 78.2 | 64.0 |
| Norway | 57.1 | 73.7 | 67.5 |
| Montenegro | | 37.4 | 33.0 |
| Albania | 29.6 | 36.7 | 38.0 |
| Serbia | 12.7 | 21.4 | 27.0 |
| Kosovo* | 20.5 | 25.7 | 25.0 |

Tableau 1-1. Part de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, 2019 (% de la consommation finale brute d'énergie) [13]

Avec plus de la moitié de l'énergie provenant de sources renouvelables dans sa consommation finale brute d'énergie, la Suède (56,4%) avait de loin la part la plus élevée parmi les États membres de l'UE en 2019, devant la Finlande (43,1%), la Lettonie (41,0%), le Danemark (37,2%) et l'Autriche (33,6%). À l'opposé, les plus faibles proportions d'énergies renouvelables ont été enregistrées au Luxembourg (7,0%), à Malte (8,5%), aux Pays-Bas (8,8%) et en Belgique (9,9%). Si l'on examine les objectifs nationaux, quatorze États membres ont déjà dépassé leurs objectifs pour 2020.

Six pays sont proches de leurs objectifs : La Hongrie, l'Autriche et le Portugal sont à 0,4 point de pourcentage (pp) de leurs objectifs nationaux, l'Allemagne (0,6 pp), Malte (1,5 pp) et l'Espagne (1,6 pp). En revanche, la France (5,8 pp), les Pays-Bas (5,2 pp), ainsi que l'Irlande et le Luxembourg (4,0 pp chacun) sont encore assez éloignés de leurs objectifs.

2.3. Énergie du bâtiment en Europe

La principale politique de l'UE en matière de bâtiments résidentiels et non résidentiels est le programme Directive sur la performance énergétique des bâtiments (Energy Performance of Building Directive EPBD) qui a été introduit en 2002 puis refondu en 2010. En vertu de la présente directive, les États membres mettent en œuvre au niveau national un ensemble de mesures concernant : les certificats de performance énergétique à inclure dans toutes les annonces de vente ou de location d'immeubles ; les contrôles réguliers du chauffage et de la climatisation. Tous les nouveaux bâtiments doivent être des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle par l'application des nouvelles réglementations environnementales, (RE 2020 en France) ; introduire un ensemble d'exigences minimales de performance énergétique pour les nouveaux bâtiments. Pour la rénovation importante de bâtiments et pour le remplacement ou la modernisation des éléments de construction (systèmes et enveloppes), des mesures et autres instruments d'incitation financière nationale doivent également être mis en œuvre pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

En contribuant à 40% de la consommation totale d'énergie finale et à 36% des émissions de CO₂, le secteur du bâtiment est le secteur majeur en matière de politiques d'efficacité énergétique [14]. En 2019, le secteur résidentiel, représentait 26,3% de la consommation finale d'énergie soit 16,9 % de la consommation intérieure brute d'énergie dans l'UE [15].

La principale utilisation d'énergie dans le secteur résidentiel est le chauffage (63,6%). L'éclairage et la plupart des appareils électriques autres que ceux dédiés chauffage, refroidissement ou à la cuisson représentent 14,1%, tandis que la consommation pour la production de l'eau chaude sanitaire est légèrement supérieure, soit 14,8%. Les principaux appareils de cuisson consomment 6,1% de l'énergie, tandis que la climatisation et les autres utilisations finales représentent respectivement 0,4% et 1,0%.



Figure 1-8. Consommation d'énergie des bâtiments dans l'UE en 2018 [15]

La grande partie de la consommation finale d'énergie de l'UE dans le secteur résidentiel est couverte par le gaz naturel (32,1%) et l'électricité (24,7%). Les énergies renouvelables représentent 19,5%, suivies par les produits pétroliers (11,6%) et la chaleur dérivée (8,7%). Une petite partie est encore couverte par le charbon (3,4%). Au cours de la période 2005-2017, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le chauffage des locaux et l'utilisation d'appareils électriques plus efficaces, ainsi que les changements de comportement induits par la hausse des prix de l'énergie et le ralentissement économique de 2008, ont tous contribué à réduire la consommation énergétique globale dans le secteur du bâtiment. Cette amélioration est cependant partiellement compensée par l'augmentation du nombre d'appareils, de la taille moyenne des logements et du nombre de logements (AEE, 2018c).

L'efficacité énergétique des différents secteurs s'est améliorée de 1,2%/an entre 2000 et 2017, avec un net ralentissement depuis 2010 (1,1%/an contre 1,4%/an avant 2007). Des gains plus importants pour le résidentiel (2,1%/an) avec un ralentissement depuis 2014 (1,4%/an contre 2,3%/an auparavant) présenté dans la figure 1-9. L'ODEX est calculé sur la base de 11 utilisations finales/grands appareils : chauffage (tep/m²) (séparation logements neufs/existants), chauffage de l'eau, cuisine (tep/habitation), refroidissement, éclairage, réfrigérateur, congélateur, machine à laver, lave-vaisselle, sèche-linge et télévision (kWh/appareil). L'augmentation des gains d'efficacité énergétique depuis 2008 est observée au niveau de l'UE et dans près de la moitié des pays, malgré la crise économique, en raison des multiples réglementations sur les bâtiments et les appareils. À l'inverse, un ralentissement important est constaté pour une dizaine de pays, comme la Roumanie, la Slovaquie, la Norvège, l'Allemagne, l'Autriche et la Slovénie [16].

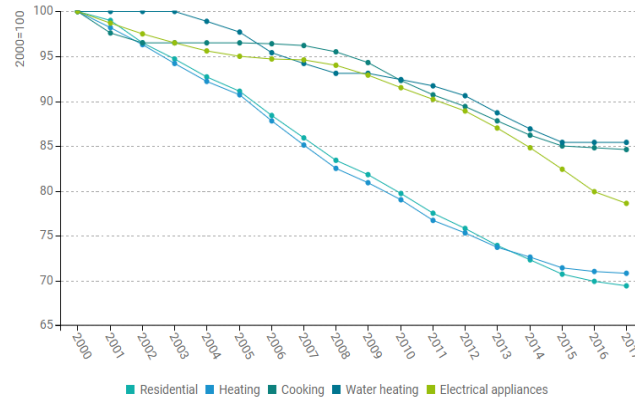


Figure 1-9. Evolution de l'efficacité énergétique en Europe depuis 2000 [16]

En 2019, les énergies renouvelables ont représenté 22,1% de la consommation totale d'énergie pour le chauffage et le refroidissement dans l'UE-27, contre 11,7% en 2004. Les développements dans le secteur industriel, les services et le résidentiel ont contribué à cette croissance [13]. L'énergie thermique aérothermique, géothermique et hydrothermale captée par les pompes à chaleur à des fins de chauffage est prise en compte. La part de l'énergie provenant de sources renouvelables dans le chauffage et le refroidissement est présentée dans la figure 1-10.

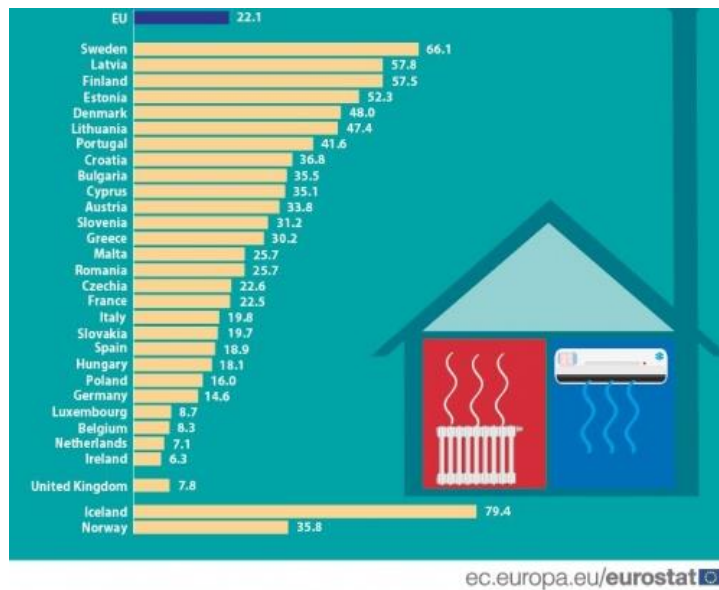


Figure 1-10. Part de l'énergie provenant de sources renouvelables pour le chauffage et le refroidissement, 2019 (% de la consommation finale brute d'énergie) [13]

Parmi les États membres de l'UE-27, la part de l'énergie provenant de sources renouvelables pour le chauffage et le refroidissement était de plus de la moitié en Suède (66,1%), en Lettonie (57,8%), en Finlande (57,5%) et en Estonie (52,3%). À l'autre bout de l'échelle, les États membres de l'UE-27 dont la part de l'énergie produite à partir de sources renouvelables pour le chauffage et le refroidissement était inférieure à 10% étaient l'Irlande (6,3%), les Pays-Bas (7,1%), la Belgique (8,3%) et le Luxembourg (8,7%).

Comme tous les États membres, la France doit adopter le Plan National Énergie et Climat (PNEC) à l'horizon 2030. La France a mis en place une méthode pour atteindre les objectifs fixés par l'UE. Le plan s'appuie en effet sur un plan énergétique pluriannuel et une stratégie nationale bas carbone, qui constitue

la feuille de route de la France pour respecter ses engagements climatiques et énergétiques. La partie suivante décrit l'énergie en France, sa stratégie au niveau de l'efficacité énergétique, sa production, et sa consommation des énergies.

3. Énergie en France

3.1. Production et consommation

La France dispose d'un mix électrique à faible émission de carbone grâce à son important parc nucléaire, mais de nombreux réacteurs arrivent en fin de vie. Le pays a entamé une transition énergétique ambitieuse dans le cadre de la loi de 2019 sur l'énergie et le changement climatique en élaborant une stratégie nationale à faible intensité de carbone, des budgets carbone, une trajectoire de prix du carbone et un cadre de planification des investissements énergétiques. La France prévoit de réduire la part du nucléaire de 70% aujourd'hui à 50% dans le mix électrique d'ici 2035. Si certains réacteurs nucléaires peuvent continuer à fonctionner à long terme dans des conditions de sécurité, le maintien de la sécurité d'approvisionnement et d'une faible empreinte carbone tout en réduisant l'énergie nucléaire nécessitera des investissements dans les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.

Selon sa définition, le taux d'indépendance énergétique de la France était en 2018 de 55,4%. La production nationale primaire représente (en 2018 mais aujourd'hui encore) plus de la moitié de l'approvisionnement énergétique du territoire. Depuis les années 90, l'intensité énergétique (ratio de la consommation d'énergie au PIB) est en baisse constante. Il en est de même pour les émissions de CO₂ liées à la combustion d'énergie, même si elles ont rebondi en 2017. À l'échelle mondiale, la consommation d'énergie a continué d'augmenter, doublant en 40 ans, principalement en raison de la croissance de la demande en Asie et surtout en Chine.

Après la mise en œuvre du programme nucléaire, la production d'énergie primaire de la France est passée de 44 Mtep en 1973 (dont 9% d'énergie nucléaire) à 134 Mtep (dont 77% d'énergie nucléaire) en 2019. En 2018 et après deux ans de baisse (-1,2% en 2017 et -5,0% en 2016), la production d'énergie primaire a augmenté de 4,2% par rapport à 2017 puis elle est a diminué de 2,7% en 2019, ce qui s'explique par le recul de la production nucléaire (-3,4%, à 104 Mtep), lié à une moindre disponibilité des centrales [17].

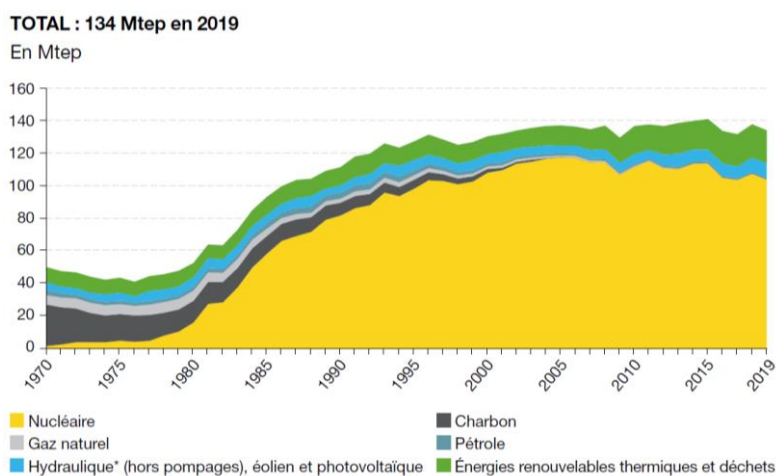


Figure 1-11. Production d'énergie en France [17]

Depuis 2005, la consommation d'énergie primaire (corrigée des variations climatiques) a légèrement diminué après avoir augmenté régulièrement et atteint le pic de 271 Mtep (figure 1-12). Alors que 2017 et 2018 montrent une stabilisation, l'année 2019 confirme cette tendance à la baisse de la consommation primaire de 1,4% (par rapport à 2018). Depuis 1990, la consommation de charbon et de pétrole a baissé respectivement de 63% et 17%. Au contraire, la consommation de l'énergie nucléaire a augmenté de 28%, celle du gaz naturel a augmenté de 46% et celle des énergies renouvelables a presque doublé. La consommation des énergies primaires en France a atteint 249 Mtep en 2018 et 245 Mtep en 2019 (données non corrigées du changement climatique). La structure actuelle de l'énergie primaire de la France comprend 41% d'énergie nucléaire, 29% de pétrole, 15% de gaz naturel, 11% d'énergies renouvelables et de déchets et 4% de charbon. Le bois énergie représente la quasi-totalité de la biomasse solide et reste la principale énergie renouvelable consommée en France, loin devant l'hydroélectricité. Son objectif principal est le chauffage.

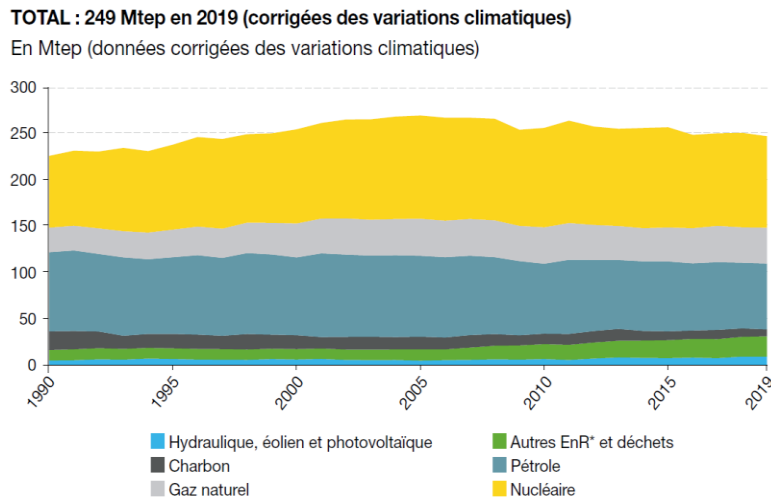


Figure 1-12. Consommation d'énergie primaire par énergie [17]

Du 1990 à 2001, la consommation finale d'énergie (corrigée des variations climatiques) [17] a augmenté pour atteindre un pic de 150 Mtep en 2001 puis diminué lentement dans les années suivantes (figure 1-13). La consommation d'énergie finale (corrigée des variations climatiques) était de 144 Mtep en 2018 et 142 Mtep en 2019, ce qui reflète l'amélioration continue de l'efficacité énergétique.

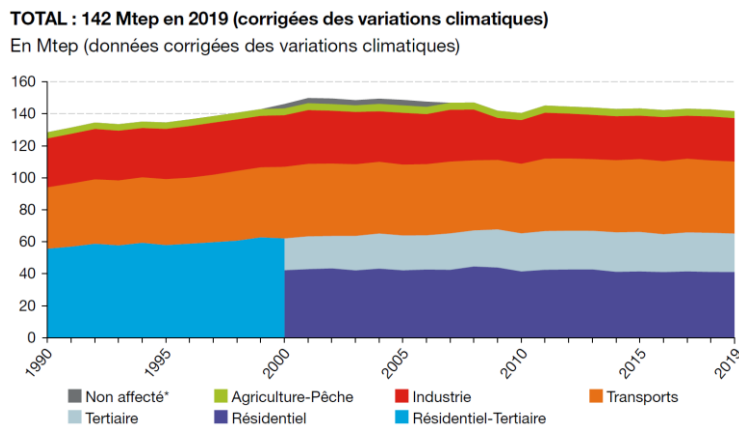


Figure 1-13. Consommation finale par secteur en France [17]

Le résidentiel-tertiaire est de plus en plus dominant : sa part dans la consommation d'énergie est passée de 43% en 1990 à 46% en 2019 (dont 29% résidentiel et 17% résidentiel). Au contraire, l'industrie est passée de 24% à 19%, le transport est passé de 30% à 32%, et l'agriculture est restée stable à 3%. La baisse observée de la consommation d'énergie finale depuis 2001 est la conséquence de la baisse du secteur industriel mais également de l'amélioration des efficacités énergétiques des secteurs résidentiel et industriel. La France s'est fixée des objectifs ambitieux en termes de développement des énergies renouvelables avec une part d'énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie d'au moins 33% à l'horizon 2030.

3.2. Énergies renouvelables en France

Les énergies renouvelables en France sont réparties en dix zones, selon la taille de la région. En raison de l'influence des précipitations, du soleil ou du vent, la production de certains secteurs peut être très différente et incontrôlable. Le climat a également un impact significatif sur la consommation d'énergie, en particulier la consommation d'énergie de la biomasse, qui est principalement utilisée pour le chauffage. La directive 2009/28/CE fixe comme objectif à la France de représenter 23% de la consommation finale d'énergie finale en 2020.

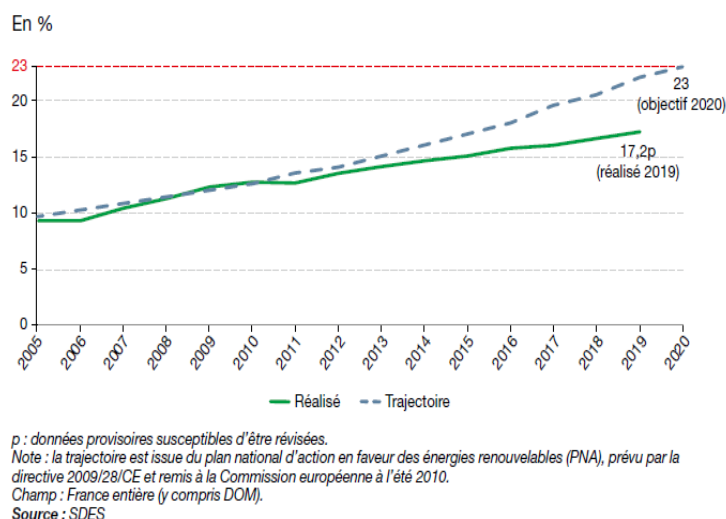


Figure 1-14. Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie [17]

En 2019, les énergies renouvelables françaises représentaient 11,7% de la consommation d'énergie primaire et 17,2% de la consommation finale d'énergie [18]. Ces parts n'ont cessé d'augmenter au cours de la dernière décennie. Depuis 2005, la production primaire d'énergies renouvelables a augmenté de manière significative (72%), principalement en raison du développement des biocarburants, des pompes à chaleur et de l'énergie éolienne. Ainsi, la part des énergies renouvelables est passée de 8% en 2005 à 17,2% de la consommation finale totale d'énergie en 2019. Cette augmentation significative de la valeur totale de la consommation finale d'énergies renouvelables est le résultat d'un investissement dans la promotion du développement des énergies renouvelables.

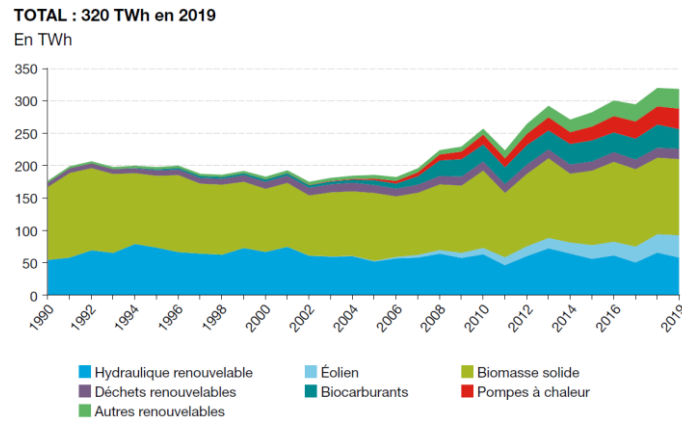


Figure 1-15. Evolution de la production primaire d'énergies renouvelables par filière [18]

Entre 2018 et 2019, la production primaire d'énergies renouvelables a légèrement reculé de 1,5 TWh (soit -0,5%). La principale raison de cette baisse est qu'après les conditions climatiques particulièrement favorables de 2018, la production d'hydroélectricité renouvelable a diminué (-12%). La production d'énergies renouvelables a atteint 320 TWh en 2019. Les principales filières sont la biomasse solide (37,1%), l'hydraulique renouvelable (18,0%), l'éolien (10,8%), les pompes à chaleur (9,9%) et les biocarburants (9,6%).

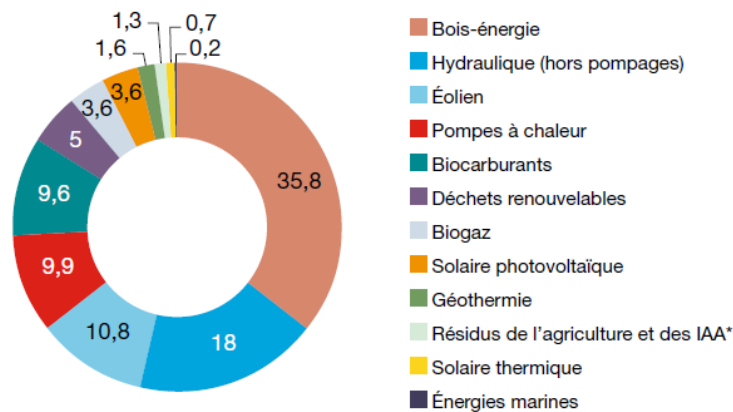


Figure 1-16. Production primaire d'énergies renouvelables par filière en 2019 [18]

3.3. Énergie du bâtiment en France

Le secteur du bâtiment (tertiaire et résidentiel) représente le plus grand consommateur d'énergie en France et le second émetteur de gaz à effet de serre après celui des transports. En 2019, la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel-tertiaire est de 46% de la consommation totale. Ces deux consommations (corrigées des variations climatiques) sont identiques en 2017 et 2018. Ces consommations proviennent de l'énergie utilisée pour répondre aux besoins des occupants et se déclinent en de multiples usages : chauffage (70% de la consommation), eau chaude sanitaire, cuisine, appareils électriques.

Les politiques de lutte contre le changement climatique placent le tertiaire résidentiel comme un domaine d'action prioritaire, non seulement en raison de son impact sur le bilan global, mais aussi parce que les solutions techniques pour réduire cet impact sont connues et directement applicables.

3.3.1. Résidentiel

Depuis 2000, dans un climat constant, la consommation d'énergie du secteur résidentiel est restée stable, atteignant 41,0 Mtep en 2019 (figure 1-17). L'électricité reste l'énergie la plus consommatrice, représentant 34% du total, devant le gaz naturel (27%), les énergies renouvelables (24%) et le pétrole (11%). Ces dernières années, la part du pétrole a diminué, tandis que les énergies renouvelables ont été soutenues et que la part de l'électricité et du gaz naturel a peu varié. En 2018, les dépenses énergétiques de ce secteur s'élevaient à 46 milliards d'euros : l'électricité (59%), le gaz naturel (23%), le pétrole (13%) et le bois (3%).

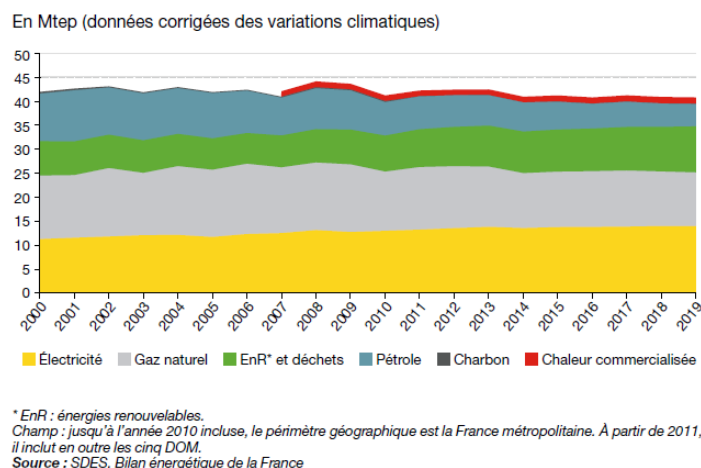


Figure 1-17. Consommation En Mtep du secteur résidentiel en France (données corrigées des variations climatique)

3.3.2. Tertiaire

Après une croissance dans les années 2000, la consommation d'énergie du tertiaire corrigée du changement climatique se stabilise (figure 1-18). En 2019, l'électricité est la principale forme d'énergie dans le secteur tertiaire, représentant 49% de l'énergie totale, suivie du gaz naturel (31%), des produits pétroliers (12%), des énergies renouvelables (3%) et de la chaleur vendue sur le réseau (4%). Le charbon ne représentait que 0,1% de la consommation totale en 2019. L'électricité représente plus des deux tiers de ces dépenses, dépassant le gaz naturel (18%), les produits pétroliers (12%) et le chauffage commercial (3%).

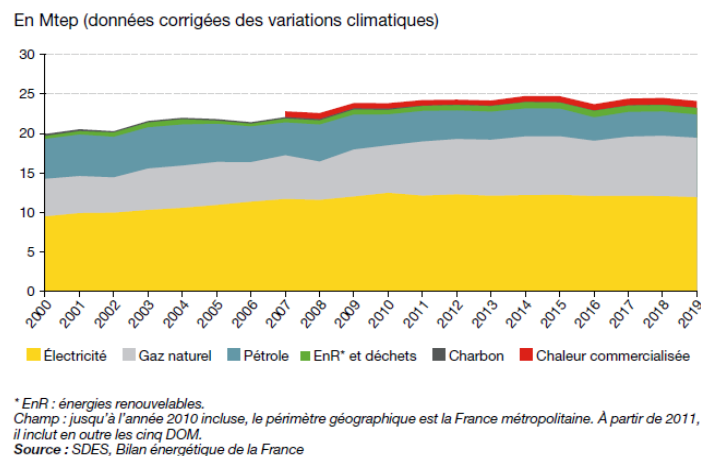


Figure 1-18. Consommation En Mtep du secteur tertiaire en France (données corrigées des variations climatiques)

En France, la région Occitanie est la première à mettre en place une consultation citoyenne. Elle est également la première région européenne à mettre en place un « Green New Deal ». Dans la partie qui suit, le programme énergétique de la région est décrit ainsi que les consommations et les productions des énergies.

4. Énergie en Occitanie

4.1. Production et consommation

L'Occitanie est la deuxième région de France métropolitaine. La région s'étend sur 72 724 km², soit 13,2% de la superficie totale de la France. Elle comprend plus de départements que toute autre région française, avec un total de 13 : Ariège, Aude, Aveyron, Gard, Haute-Garonne, Gers, Hérault, Lot, Lozère, Hautes-Pyrénées, Pyrénées-Orientales, Tarn et Tarn-et-Garonne. L'Occitanie possède 220 kilomètres de côte sur la Méditerranée et bénéficie de plus de 300 jours d'ensoleillement par an.

La région s'est engagée en 2016 à devenir la première région à énergie positive en Europe (REPOS) [19], [20]. Cet objectif permet de fixer un cap à 2050, d'établir des objectifs à long terme, des trajectoires de développement, et de mettre en œuvre des plans d'actions ambitieux partagés avec les acteurs de la région. Le Coefficient REPOS est défini en% par le rapport de la consommation d'énergie d'origine renouvelable produite en Occitanie sur la demande finale énergétique totale (hors pertes du système énergétique). Le bâtiment est le principal secteur de consommation de la région (près de la moitié de la demande énergétique de la région) devant les transports. En raison des avantages des produits pétroliers dans le transport, bien que leurs types aient tendance à se diversifier, ce domaine est toujours dominé par les produits pétroliers.

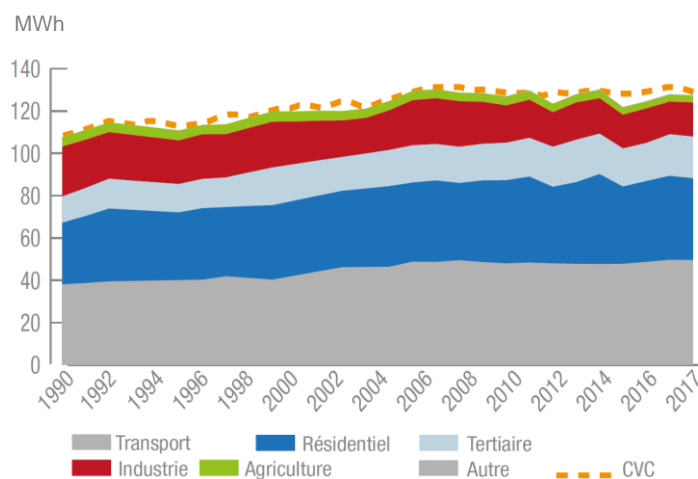


Figure 1-19. Évolution de la consommation d'énergie finale en Occitanie

Depuis 2005, la croissance démographique de la région Occitanie-Pyrénées-Méditerranée a largement dépassé celle des régions françaises avec une consommation finale d'énergie assez stable. Les consommations énergétiques [21] des bâtiments résidentiels (32% du total) et du tertiaire (15%) sont assez stables, avec un ralentissement des consommations unitaires c'est-à-dire ramenées à la population ou au nombre de résidences principales. Après une forte croissance, la consommation d'énergie dans le secteur des transports (38% du total) a légèrement diminué depuis 2005 (-3,5% de 2005 à 2014), mais 99% dépendent toujours du pétrole. L'efficacité énergétique du secteur industriel est améliorée grâce au découplage relatif entre la consommation d'énergie et la valeur ajoutée du secteur. En conséquence,

l'énergie consommée par million d'euros d'activité est passée de 0,12 tonne équivalent pétrole en 2005 à 0,08 tonne équivalent pétrole en 2013.

En 2015, la source de biomasse fournit 11,1 TWh, l'éolien 2,4 TWh, l'hydraulique 10,2 TWh, les autres énergies renouvelables 0,4 TWh, pour un total, d'énergies renouvelables livrées de 24,1 TWh. Le pétrole (59,1 TWh) et le gaz naturel (19,9 TWh) sont entièrement importés et la centrale nucléaire de Golfech produit 18,7 TWh. Le coefficient REPOS était donc en 2015 de 19,4%. Ainsi, à partir de ce point de départ de 19,4%, l'objectif du scénario REPOS 1.0 est d'évaluer les caractéristiques d'une trajectoire énergétique pour que le coefficient REPOS atteigne 100% d'ici 2050, tout en s'assurant que cette trajectoire est techniquement, économiquement, écologiquement et socialement réalisable.

Entre 2016 et 2017, la consommation d'énergie finale de l'Occitanie [21] est restée inchangée à environ 127 TWh. Après deux ans de croissance, une partie de cette stabilité peut être attribuée à la faible baisse de la demande d'énergie dans le secteur résidentiel et à la stabilité de la demande dans le secteur des transports. En 2017, la consommation énergétique totale finale était de 127,4 TWh, tandis que l'énergie livrée produite par les énergies renouvelables était de 26,4 TWh. Donc le coefficient REPOS en 2017 est de 20,7%.

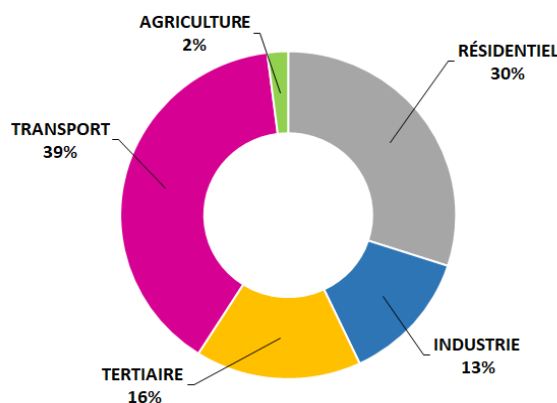


Figure 1-20. Consommation finale des énergies par secteur en 2017 [20]

Enfin, malgré l'augmentation de la population, la consommation d'énergie (tous usages, toutes énergies) de ce secteur résidentiel devra passer de 39,3 TWh à 29,6 TWh (-24,7%) entre 2015 et 2050.

4.2. Énergies renouvelables en Occitanie

L'Occitanie envisage de devenir la première région énergétique d'Europe d'ici 2050. Pour cela, la région [20] s'est fixée comme objectif d'installer 15070 MW de capacité photovoltaïque d'ici 2050, donc sa capacité actuelle doit être multipliée par 12.

L'Occitanie occupe la deuxième place du classement régional des énergies positives en 2017, avec une production d'électricité de 1666 MW, notamment dans le Parc régional d'activités économiques (PRAE), où l'installation de panneaux photovoltaïques se multiplie [22]. L'Occitanie est l'une des régions les plus avancées dans le domaine des énergies renouvelables. Cette région forestière, ensoleillée et venteuse dispose de plus en plus de ressources exploitées. L'Occitanie est la région avec le plus grand potentiel pour l'éolien offshore, la deuxième plus grande région pour le photovoltaïque et l'hydroélectricité et la troisième plus grande région pour l'énergie éolienne [23], [24].

En 2017, la production d'énergies renouvelables a atteint 26,4 TWh. Au cours de la dernière décennie, nous avons vu une augmentation de la production d'énergies renouvelables et une diversification des

méthodes de production. Jusqu'à présent, le bois-énergie reste la principale source d'énergies renouvelables, suivie de l'hydroélectricité. Les productions de chaleur renouvelable (48%) et d'électricité renouvelable (52%) sont presque au même niveau.

Les émissions de GES liées à l'énergie (à l'exclusion des émissions directes de l'UTCATF) sont d'un peu plus de 21 MteqCO₂. Après avoir augmenté continuellement de 1990 à 2004, elles sont en baisse (-9%) depuis 2005 pour se stabiliser près de la valeur actuelle de ces dernières années. Ces émissions sont fortement dépendantes du mix énergétique et du poids des produits pétroliers. Au cours des quinze dernières années, elles ont connu un très fort développement, notamment l'éolien et le solaire photovoltaïque. Cependant, en Occitanie, la production d'énergies renouvelables est toujours dominée par les secteurs traditionnels : l'hydroélectricité et le bois énergie.

4.3. Énergies du bâtiment en Occitanie

Les secteurs résidentiels (38,6 TWh) et tertiaire (19,7 TWh) représentent ensemble près de la moitié des consommations. Le bâtiment dans la région d'Occitanie représente 46% de la consommation d'énergie finale et près de 24% des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, l'un des leviers d'action de la région est de construire de nouveaux bâtiments à très basse consommation d'énergie et de rénover énergétiquement les bâtiments existants. Le secteur résidentiel se caractérise par une forte sensibilité thermique au changement climatique. En moyenne, les ménages consomment 60% de leur énergie pour le chauffage. Ceci explique les fortes variations que l'on peut observer, notamment les années très chaudes ou très froides.

La structure énergétique des secteurs résidentiel et tertiaire est principalement contrôlée par l'électricité, représentant près de la moitié de la structure énergétique en 2017 (figure 1-21). De 2005 à 2017, la consommation des secteurs résidentiel et tertiaire a augmenté de 6% (+15% après ajustement climatique). Cette part peut être attribuée aux nouveaux logements construits en Occitanie (plus de 560 000 depuis 2005, source) et à l'augmentation de la superficie (+19 millions de mètres carrés).

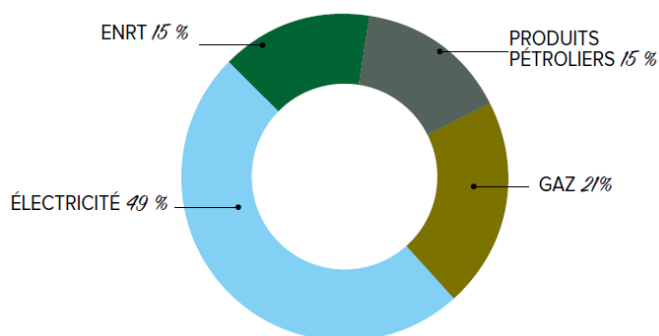


Figure 1-21. Mix énergétique du résidentiel/tertiaire 2017 [21]

Concernant les logements neufs, le scénario REPOS suppose que la consommation énergétique des logements basse consommation est inférieure à la réglementation thermique actuelle (RT 2012) et proche des habitations passives. La demande en énergie thermique étant alors très faible, les chaudières et radiateurs ou modes de chauffage traditionnels « tout électrique » disparaissent progressivement au profit du développement des technologies basse température, comme les pompes à chaleur hautes performances à récupération de chaleur (chaleur de l'air ou de l'environnement au sol).

Dans le programme REPOS, ce processus est mené après plusieurs années de démarrage et de formation des parties prenantes. D'ici 2030, le taux annuel moyen de rénovation est très stable, atteignant 52 000

logements, puis une moyenne de 75 000 rénovations par an. Ce plan de rénovation est l'un des piliers du plan REPOS, qui réduira la précarité énergétique en consolidant les activités dans le secteur de la construction, en améliorant la qualité des bâtiments existants et en ayant un impact régional significatif.

La planification énergétique pluriannuelle prouve que la politique énergétique se caractérise par de nombreux objectifs. Depuis plus de 40 ans, la France s'engage pour la protection de l'environnement en encourageant des mesures pour favoriser la transition énergétique nationale. Cet engagement se traduit par l'évolution des réglementations thermiques. Un historique des réglementations thermiques est développé à la suite de cette partie pour contribuer à la réduction des consommations énergétiques des bâtiments, des émissions de gaz à effet de serre et donc du réchauffement climatique de la planète.

5. Historique des réglementations thermiques

Après la première crise pétrolière en 1973, la première réglementation thermique (RT) a été instaurée pour sensibiliser les concepteurs à l'économie énergétique. La première RT apparaît en 1974. Elle ne s'applique qu'aux bâtiments résidentiels neufs et vise à réduire la consommation énergétique des bâtiments de 25%, en imposant l'installation d'une fine couche d'isolation et un système de chauffage réglable automatiquement.

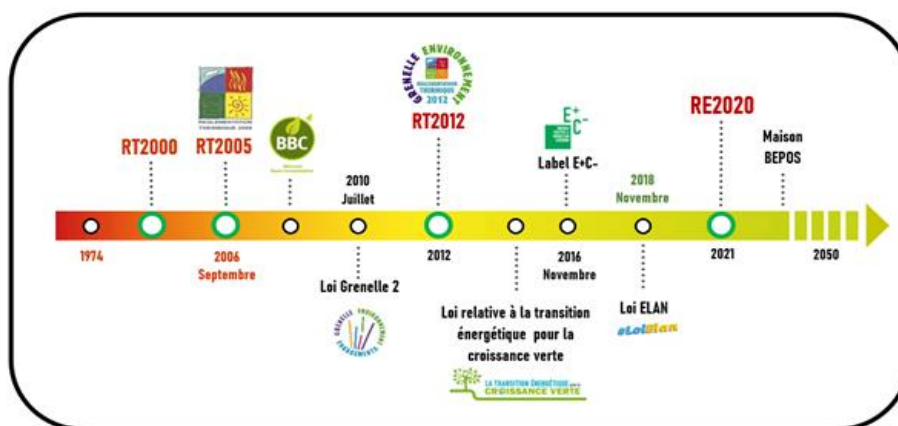


Figure 1-22. Evolution de la réglementation thermique depuis 1974

La deuxième crise pétrolière en 1979 a conduit à la sortie de la RT 1982. Par rapport à la précédente, l'objectif de cette nouvelle réglementation thermique est de réduire de 20% la consommation énergétique du bâtiment. La RT 2000, à la différence des réglementations précédentes (qui stipulent uniquement les besoins en ressources), introduit des exigences de performance globale du bâtiment et de confort d'été. Par rapport à la RT en 1988, l'objectif de la RT 2000 est de réduire la consommation maximale des logements de 20% et la consommation des bâtiments de 40%.

En 2005, une nouvelle réglementation a été mise en place sur la base de la RT 2000 en ajoutant des exigences et des garanties aux consommateurs. L'objectif de la RT 2005 est alors de réduire encore de 15% la consommation d'énergie des nouveaux bâtiments et rénovations.

Le bâtiment neuf ne devra donc pas dépasser les 90 kWh/m².an (consommation de référence). 5 nouveaux labels sont créés pour attester de leur performance énergétique :

- le label Haute Performance Énergétique (HPE) pour les bâtiments dont la consommation est inférieure à 10% par rapport à la consommation de référence.

- le label Très Haute Performance Énergétique (THPE) pour les bâtiments dont la consommation est inférieure à 20% par rapport à la consommation de référence.
- le label Haute Performance Énergétique énergies renouvelables (HPE EnR) qui valorise les équipements de chauffage utilisant une énergie renouvelable.
- le label Très Haute Performance Énergétique énergies renouvelables (THPE EnR) qui comprend la production de chauffage ou d'eau chaude sanitaire assurée par une énergie renouvelable.
- le label BBC (Bâtiment Basse Consommation) pour les constructions dont la consommation énergétique globale ne dépasse pas les 50 kWh/m²/an.

C'est sur la base de ce dernier label de la RT 2005, que la RT 2012, première mesure de la loi Grenelle 2, a été développée.

5.1. Loi Grenelle 2

La loi « Engagement de l'Etat pour l'environnement » promulguée le 12 juillet 2010 est le Grenelle 2, qui correspond à la mise en œuvre de certains engagements environnementaux du Grenelle. Les 248 articles qui composent cet important texte de loi ont été considérablement enrichis par le Parlement, notamment six mesures clés :

- bâtiments et urbanisme avec un double objectif : diviser par cinq la consommation énergétique des nouveaux bâtiments en 2012 par rapport à l'année 1990 et réviser les règlements d'urbanisme pour promouvoir les énergies renouvelables ;
- transport avec des mesures propices au développement des transports collectifs urbains ou à la promotion du développement de modes alternatifs de transport de marchandises ;
- Énergie et climat, son objectif principal est de réduire de 20% les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2020 ;
- préserver la diversité biologique en termes d'agriculture : protection des espèces et des habitats, d'assainissement et de réserves d'eau ;
- prévenir la pollution sonore ou lumineuse ainsi que des mesures visant à responsabiliser les producteurs de déchets en matière de protection de la santé et de gestion des déchets.
- engager la concertation en amont des projets grâce, notamment à la rénovation des enquêtes publiques et à l'intégration d'associations d'éducation à l'environnement dans les instances de consultation.

5.2. La réglementation thermique Française 2012

La RT 2012 [25] est une réglementation thermique qui s'applique en France aux constructions neuves du secteur tertiaire (bureaux, bâtiments d'enseignement primaire et secondaire après le 28 octobre 2011 et à tous les bâtiments résidentiels après le 1er janvier 2013.

Des discussions ont eu lieu dans le cadre environnemental du Grenelle, qui a fixé le seuil maximal de consommation moyenne d'énergie primaire (Cepmax) des bâtiments neufs à 50 kWh/m²/an. À quelques exceptions près, il s'applique à tous les projets de construction en France. La RT 2012 très exigeante, est basée sur l'ancien label BBC (Low Energy Building) de la RT 2005.

La RT 2012 comporte trois exigences de résultats relatives à la performance du bâtiment. Les exigences relatives aux coefficients Bbio et Cep sont désormais exprimées en valeur absolue, et non plus en valeur relative. Elles portent sur la performance globale du bâtiment et non sur les performances des éléments

constructifs et systèmes énergétiques pris séparément. Ainsi, une plus grande liberté de conception est laissée aux maîtres d'œuvre. L'indice Bbio est une innovation majeure de RT 2012. Il met l'accent sur la qualité inhérente de la conception architecturale. L'approche bioclimatique optimise notamment l'orientation, le gain solaire, la lumière naturelle, le niveau d'isolation, l'inertie, la compacité et la copropriété.

L'exigence sur le Cep (consommation conventionnelle en énergie primaire du bâtiment) comprend cinq usages : le chauffage, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage et les équipements auxiliaires. Cette valeur est modulée selon le type de bâtiment, l'altitude et la zone climatique (la France est divisée en 8 zones climatiques), la surface RT du bâtiment, ainsi que le niveau d'émission de GES. Le seuil (moyen) annuel de 50 kWh_{ep}/m² et divisé par trois les consommations moyennes des bâtiments issus de la RT 2005.

Une autre innovation majeure de RT 2012 est liée à la qualité intrinsèque du bâtiment, et non au système énergétique utilisé : les différents composants du bâtiment (chauffage, refroidissement et éclairage artificiel) doivent avoir une demande énergétique cumulée limitée (Bbiomax). La RT 2012 prévoit aussi la limitation d'une température intérieure maximale conventionnelle dans les bâtiments en période de forte chaleur l'été, un recours aux énergies renouvelables en maison individuelle, le traitement des ponts thermiques et de l'étanchéité à l'air ou encore une surface minimale de baies.

5.3. Label E+C-

La loi de transition énergétique favorise la croissance verte. La transition énergétique est un objectif écologique, y compris la transition du système énergétique actuel vers un nouveau système énergétique basé sur les ressources renouvelables. Il s'agit principalement de réduire la consommation de combustibles fossiles dans la plupart des activités humaines : industrie, transport, éclairage, etc.

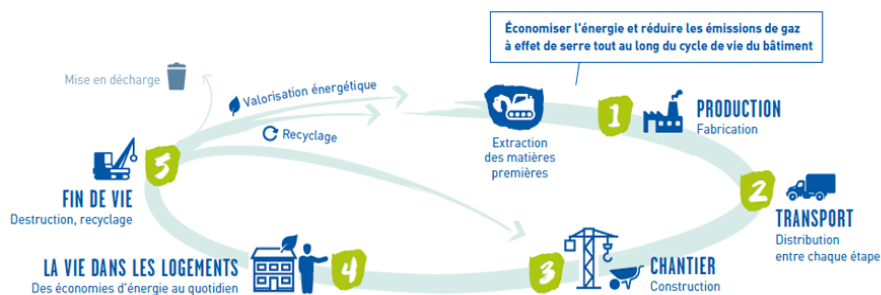


Figure 1-23. Cycle de vie [26]

Après avoir conclu l'Accord de Paris à l'occasion de la 21^e Conférence des Nations Unies sur le changement climatique (COP21), le pays et les acteurs du BTP se sont engagés dans l'ambition sans précédent de produire une énergie active et des bâtiments bas carbone. La France considère le BTP comme le cœur de sa stratégie pour relever les défis du changement climatique.

En 2018, la loi de transition énergétique pour la croissance verte établit des normes environnementales pour les nouveaux bâtiments. Ainsi, l'ambition est de contribuer à la lutte contre le changement climatique avec deux axes principaux autour des bâtiments neufs :

- Promotion de bâtiments à énergie positive.
- De la conception à la démolition, déployer des bâtiments à faible empreinte carbone tout au long du cycle de vie (figure 1-23).

Le label E+C- « Bâtiments à énergie positive et à réduction des émissions de carbone » [27] est lancé en novembre 2016 et préfigure de la nouvelle réglementation environnementale RE 2020. Il a été créé pour accompagner cette démarche et répondre aux performances spécifiques des futurs bâtiments neufs avec des performances énergétiques et environnementales. Il est composé du niveau d'énergie (évalué par l'indicateur « bilan BEPOS ») et du niveau de carbone (évalué par l'indicateur « carbone »). Afin de prendre en compte la particularité du type, de l'emplacement et du coût du bâtiment, il est recommandé de fixer le niveau de performance énergétique au niveau 4 (

figure 1-24) et le niveau de performance carbone au niveau 2 (figure 1-25).

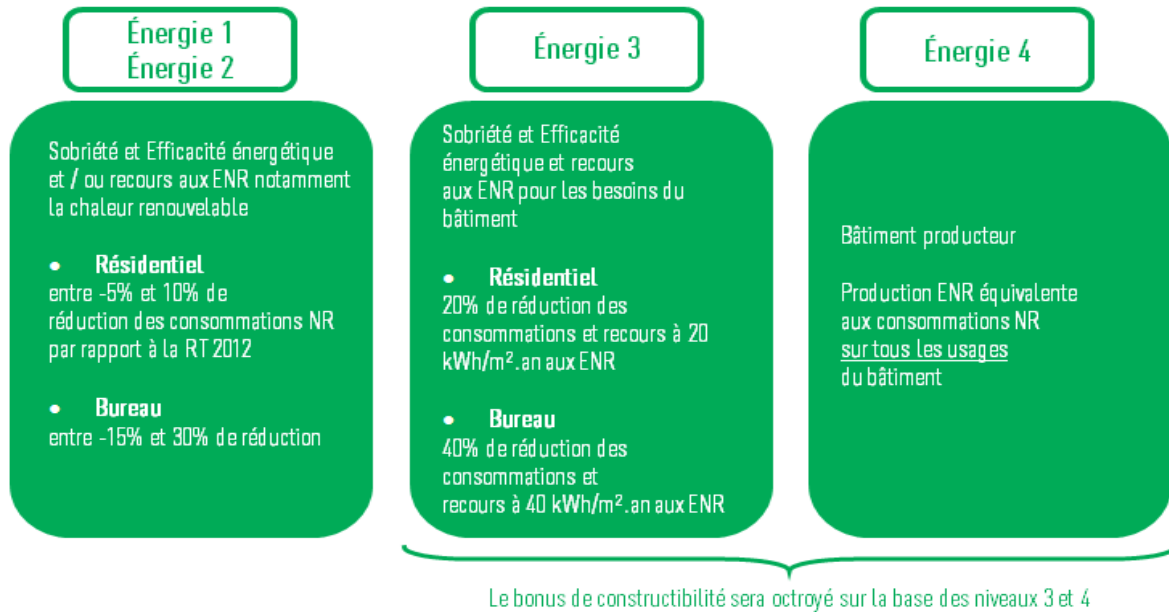


Figure 1-24. Les 4 niveaux d'énergie de l'E+C- [28]

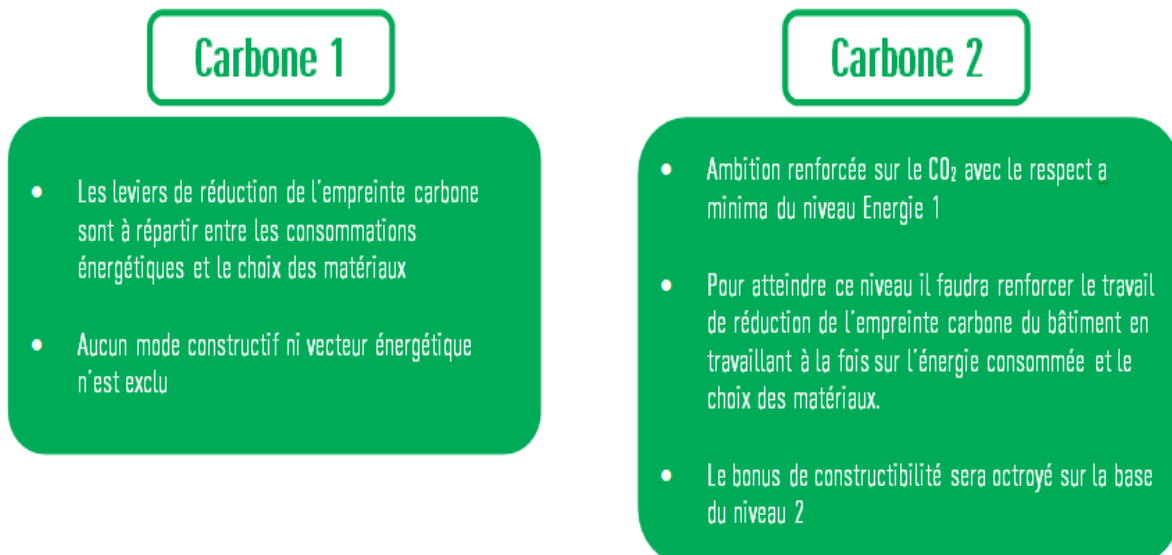


Figure 1-25. Les 2 niveaux Carbon de l'E+C- [28]

Le niveau « énergie » basé sur l'indicateur Bilan BEPOS, et le niveau « carbone » basé sur les indicateurs suivants :

- Eges : indicateur des émissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie.
- EgesPCE : indicateurs d'émission de gaz à effet de serre générés par les produits et équipements de construction utilisés.

L'expérimentation E+C- est une procédure volontaire basée sur la réglementation RT 2012. La réglementation RT 2012 est bien sûr toujours obligatoire, mais c'est la base de l'expérience.

L'expérimentation E+C- élargit le champ de la recherche énergétique en considérant les facteurs suivants :

- D'une part, la consommation de tous les usages du bâtiment, et pas seulement les 5 de la RT 2012 (chauffage, climatisation, ventilation, éclairage, auxiliaires).
- D'autre part, non seulement des bâtiments, mais aussi des parcelles. Toute consommation du bâtiment doit être prise en compte pendant la phase d'exploitation.

Dans le cadre du référentiel E+C-, le programme objectif bâtiment (OBEC) fournit une base statistique quantitative et qualitative pour discuter et analyser le contenu et les enjeux du benchmark avec les acteurs de l'industrie.

13 consultants « recommandés » (1 dans chaque région) sont chargés d'accompagner ou d'exécuter 130 projets et 224 calculs E+C- pour évaluer la consommation énergétique et l'impact environnemental des bâtiments neufs. Le système a été achevé en décembre 2019 et peut utiliser les données de toute la région métropolitaine.

Afin de préparer les futures réglementations environnementales en matière d'énergie thermique pour les nouveaux bâtiments, une expérimentation nationale a été lancée pendant deux ans pour tester de nouveaux niveaux d'ambition et des enjeux de faisabilité dans la réalité. Les futures réglementations remplaceront l'actuelle réglementation thermique 2012 (RT 2012).

5.4. Réglementation environnementale 2020

La nouvelle construction et la nouvelle réglementation environnementale "RE 2020" sont régies par la loi "Logement, Planification et Révolution Numérique" (ELAN) et devront entrer prochainement en vigueur [29].

Son principal défi est de réduire significativement les émissions de carbone des bâtiments. Pour cela, elle s'appuie sur la transformation progressive des techniques de construction, des filières industrielles et des solutions énergétiques pour maîtriser les coûts de construction et assurer l'amélioration des compétences professionnelles. Afin de réduire l'impact sur le climat des bâtiments neufs, la nouvelle réglementation va promouvoir les équipements et matériaux peu émetteurs de gaz à effet de serre (par exemple, l'isolation biosourcée) d'une part, et encourager l'utilisation d'énergie décarbonée (par exemple, bois et chauffage à énergies renouvelables).

Les objectifs de la RE 2020 [30], [31] sont d'améliorer la performance énergétique et le confort des bâtiments tout en réduisant leurs émissions de carbone. Ils tournent autour de trois axes principaux :

- Renforcer les exigences en matière d'indicateur de besoin bioclimatique : Bbio
- Réduire l'impact sur le climat des nouveaux bâtiments en tenant compte des émissions de tous les bâtiments pendant tout le cycle de vie, de la construction à la fin de leur durée de vie

- Poursuivre un objectif de confort en été : des lieux de vie et de travail qui s'adaptent aux conditions climatiques futures.

Le règlement devrait entrer en vigueur à l'été 2021. Cette réglementation s'appliquera aux bâtiments qui demanderont des permis de construire.

6. Conclusion

Au niveau mondial, l'Union Européenne (à 28 pays) est le troisième plus gros consommateur d'énergie avec une consommation finale de 983,6 Mtep en 2019 après la Chine (1888 M tep en 2018) et les États-Unis (1444,7 Mtep). En 2017, l'UE à 28 est responsable de 10% des émissions de CO₂ dans le monde derrière la Chine (29,3%) et les USA (13,8%) dont le total est évalué à 37,1 Gt CO₂.

En 2021, des trois objectifs du plan Européen 20-20-20, deux ont été atteints et même dépassés. En effet, en 2019, l'UE a réduit ses émissions de GES de 25% par rapport à 1990 [32] et la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie est de 23% pour 2020 [33]. En Europe, le bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le premier secteur consommateur d'énergie avec 40% d'énergie finale totale devant le secteur des transports (31%).

En 2017, les émissions de CO₂ sont de 5,2 t CO₂/hab en France contre 6.9 t CO₂/hab en Europe. En France, le secteur du bâtiment représente 46% de la consommation d'énergie finale qui s'élève à 142 Mtep en 2019. Cette consommation d'énergie finale a subi une réduction de 5% depuis 2001 due aux efforts entrepris au niveau des différents secteurs surtout le résidentiel et l'industrie et à la mise en place des plans de programmation pour la transition énergétique.

En 2015, l'Occitanie a mis en place un plan énergétique pour devenir la première région Européenne à énergie positive (REPOS) d'ici 2050. En 2017, le coefficient REPOS défini par la part d'énergie d'origine renouvelable sur la consommation finale d'énergie de la Région est de 21%. Le secteur du bâtiment représentant 46% de la consommation finale totale, la rénovation énergétique des logements est envisagée à hauteur de 75 000 rénovations annuelles. Même si l'hydroélectricité et le bois énergie sont les principales sources d'origine renouvelable, les parcs éoliens (offshore) et solaires dans la région doivent être multipliés afin que la production des énergies d'origine renouvelable en 2050 devienne 3 fois celle de 2015.

La maîtrise des consommations énergétiques dans le bâtiment est un enjeu important de la transition énergétique en France. La loi du Grenelle 2 en 2010 a visé de réduire par cinq la consommation énergétique des nouveaux bâtiments en 2012 par rapport à l'année 1990. La RT 2012 définit le seuil maximal de consommation moyenne d'énergie primaire des bâtiments neufs à 50 kWh/m²/an. En préalable à la RE 2020, le label E+C- s'est mis en place dans le but de promouvoir des bâtiments à énergie positive et de concevoir des bâtiments à faible empreinte carbone. Les objectifs de la RE 2020 sont de réduire les besoins énergétiques, leur impact sur tout le cycle de vie en prenant en compte le confort d'été des occupants. Le confort et le comportement de l'occupant dans le bâtiment font l'objet du chapitre 2. Les méthodes d'évaluation du confort sont développées ainsi que les actions de l'occupant interagissant sur le bâtiment.

CHAPITRE 2 : CONFORT ET COMPORTEMENT DE L'OCCUPANT DANS LE BATIMENT

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 51 |
| 2. Confort thermique | 51 |
| 2.1. Définition..... | 51 |
| 2.2. Evaluation du confort thermique | 54 |
| 2.3. Approche adaptative..... | 56 |
| 2.4. Les normes du confort thermique..... | 57 |
| 2.5. Zone de confort thermique | 58 |
| 3. Le comportement de l'occupant..... | 59 |
| 3.1. Modèle RT 2012 du comportement thermique de l'occupant | 60 |
| 3.2. Actions réelles de l'occupant dans le bâtiment | 60 |
| 4. Conclusion..... | 62 |

1. Introduction

La notion du confort thermique dans un bâtiment est non seulement importante vis-à-vis de la qualité de l'environnement intérieur en termes de taux de CO₂, d'humidité de l'air et de concentration de composés organiques volatils (COV) mais aussi vis-à-vis de la production d'énergie par les équipements du bâtiment. En effet, l'énergie utilisée pour le chauffage, la ventilation ou la climatisation des bâtiments constitue la grande majorité de la consommation énergétique de ce secteur qui représente 45% de la consommation finale d'énergie de France. Avec l'attention croissante portée au développement durable, le secteur de la construction doit répondre à deux exigences fondamentales : maîtriser l'impact sur l'environnement extérieur tout en garantissant un environnement intérieur sain et confortable. En fait, dans la définition du confort thermique, sont considérés les rôles de la physiologie, de la physique, de la psychologie et de la sociologie. Le confort thermique s'exprime généralement par la satisfaction des occupants vis-à-vis de l'ambiance thermique dans laquelle ils se trouvent [34].

Pour assurer le confort thermique, l'occupant, compte tenu de sa production de chaleur par son métabolisme doit en permanence assurer son équilibre thermique. Pour cela, il dispose d'un système de régulation de la température qui régule ses échanges thermiques avec l'environnement par des réponses conscientes (adaptation comportementale) et inconscientes (vasoconstriction, tremblements et transpiration). Lorsque le bilan thermique global est nul, le corps humain assure son équilibre thermique. Bruant [35] énonce que cette neutralité thermique doit être produite avec peu (ou pas) de réponse physiologique pour caractériser le confort de l'ambiance thermique. Cependant, outre les facteurs physiques et physiologiques qui contrôlent la sensation thermique, des facteurs sociaux et psychologiques affectent également le confort thermique. En effet, la satisfaction perçue par les occupants dans un environnement donné s'exprime comme le rapport entre la satisfaction des occupants sur les conditions thermiques actuelles du bâtiment et celle réellement attendue par les occupants [36].

Le confort thermique est une sensation physique propre à chacun de nous, liée à la température de l'ambiance mais également l'humidité de l'air et la vitesse de déplacement de l'air. Ainsi, le confort thermique peut être défini comme un sentiment de bien-être dans un environnement donné.

Le confort thermique a été le sujet de nombreux travaux de recherche. Ces travaux ne concernent pas uniquement les bâtiments, mais aussi les moyens de transport (voitures, avions) ou les lieux de travail (sous des conditions extrêmes). En ce qui concerne les bâtiments, la recherche sur le confort thermique est partagée entre deux approches. La première étudie le confort thermique d'une façon analytique. Elle n'est pas restreinte aux bâtiments. La deuxième est l'approche adaptative, basée sur l'incapacité de l'approche analytique à représenter la réalité du confort thermique dans les bâtiments.

2. Confort thermique

2.1. Définition

La méthode d'analyse du confort thermique repose sur le calcul du bilan thermique du corps humain, principalement à travers des modèles physiques et physiologiques. Le but est de prédire la sensation thermique de l'occupant pour identifier les conditions de confort thermique. Le modèle physique est également utilisé pour calculer les échanges thermiques (conduction, convection, rayonnement et évaporation) entre l'occupant et son environnement.

2.1.1. Le bilan thermique

La chaleur métabolique générée dans le corps peut être stockée dans le corps, provoquant une élévation de la température interne, ou peut être émise dans l'environnement par la surface de la peau et les voies respiratoires (figure 2-1).

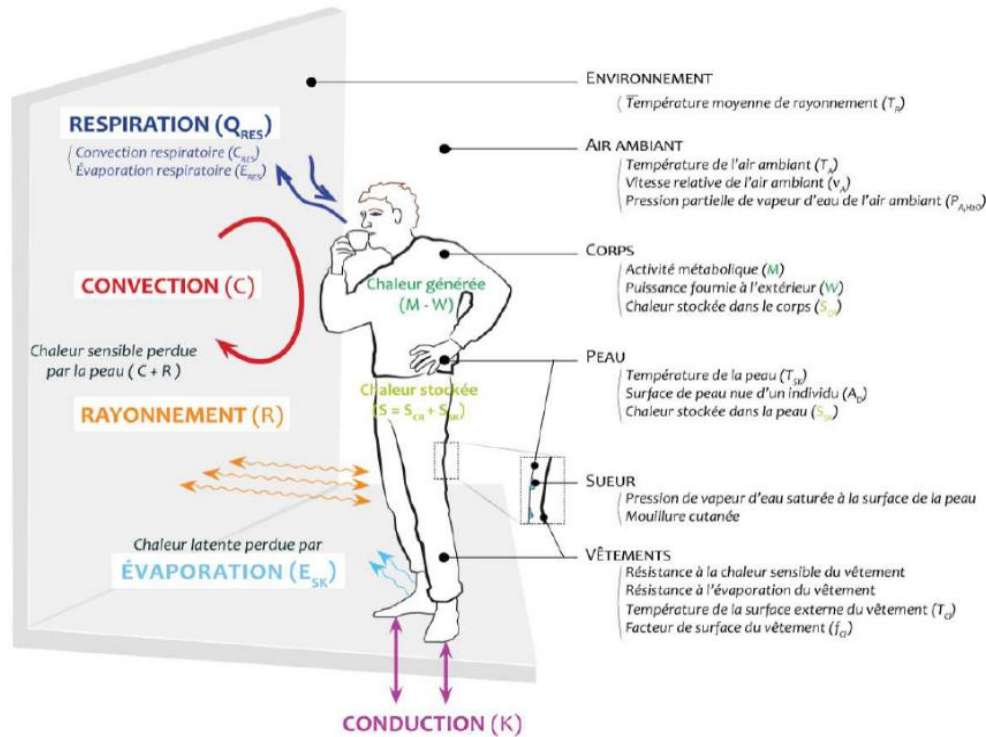


Figure 2-1. Interactions thermiques entre l'homme et son environnement de l'auteur

D'après ASHRAE [37], le bilan thermique du corps humain s'écrit comme suit :

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S = (C + R + K + Esk) + (C_{res} + E_{res}) + S_{sk} + S_{cr} \quad [\text{Éq. 2-1}]$$

Avec :

M = taux du métabolisme, W/m^2

W = travail externe, W/m^2

Q_{res} = flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m^2

Q_{sk} = flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m^2

C_{res} = flux de chaleur échangé par convection respiratoire, W/m^2

E_{res} = flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire, W/m^2

C = flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de peau, W/m^2

R = flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de peau, W/m^2

K = flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de peau, W/m^2

E_{sk} = flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de peau, W/m^2

S_{cr} = taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, W/m^2

S_{sk} = taux de chaleur stockée dans la peau, W/m^2

La chaleur générée par le corps humain est émise dans l'environnement à travers la surface de la peau et les voies respiratoires sous la forme d'une chaleur latente importante. La convection, le rayonnement et la conduction sont les trois modes d'échange thermique sensibles à la surface de la peau, la chaleur latente étant absorbée par l'évaporation de la sueur à la surface de la peau. La ventilation respiratoire dissipe la chaleur corporelle par convection (chaleur sensible) et évaporation (chaleur latente).

Le confort thermique n'est cependant pas qu'une question de température et de comportement de l'individu, mais repose sur de nombreux autres critères, tels que l'humidité, la qualité et la vitesse de l'air intérieur et également des effets de parois froides.

Le métabolisme total M peut être mesuré expérimentalement à partir de la quantité d'oxygène consommée. En pratique, les estimations sont fondées sur un tableau du métabolisme basé sur la description de l'activité ou de la tâche. Le métabolisme est lié à la surface corporelle. Il est généralement exprimé en Met équivalent à 1 kcal/(kg*h). Le Met correspond à 58,15 W/m² pour le métabolisme d'un individu assis au repos. La norme ISO 8996 [38] a proposé plusieurs méthodes de détermination du métabolisme. Selon l'exactitude, il est divisé en trois niveaux : le premier niveau est classé par type d'activité et par profession. Le deuxième niveau correspond à l'estimation des composants actifs. Au troisième niveau, le métabolisme est déterminé par mesure directe.

Le métabolisme est défini comme l'addition de plusieurs sources énergétiques :

$$M = BM + MP + MW + MM \quad [\text{Éq. 2-2}]$$

Avec :

BM : métabolisme basal en W/m²

MP : composante posturale en W/m²

MW : composante d'activité en W/m²

MM : composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse, W/m²

2.1.2. Température de l'air ambiant

Les échanges thermiques que subit l'individu avec l'air environnant sont d'ordre convectif et régis par la vitesse d'air et l'écart de température de l'air avec celle du corps.

2.1.3. L'humidité de l'air

Comme à l'extérieur, l'humidité relative de l'air intérieur affecte notablement le confort thermique ressenti. Elle devrait être comprise entre 40% et 60% en hiver pour faciliter le phénomène d'évapotranspiration. La mise en place d'une ventilation mécanique contrôlée permet de limiter l'augmentation d'humidité produite par l'activité humaine et d'obtenir le taux d'humidité souhaité.

2.1.4. Température des parois

La température des parois opaques et vitrées (portes, fenêtres, etc.) peut également avoir un impact significatif sur le confort thermique et la température perçue. Contrairement au double vitrage peu émissif, le simple vitrage émet un rayonnement froid, ce qui peut produire une sensation désagréable en hiver. Les murs froids ou les planchers froids émettront le même rayonnement désagréable. La température du mur doit être aussi proche que possible de celle de l'air ambiant pour réduire la sensation de froid et améliorer le confort perçu.

2.1.5. Température opérative

La température opérative d'un local prend en compte l'effet des échanges par convection et par rayonnement. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$T_{op} = \frac{h_r * T_{RM} + h_c * T_a}{h_c + h_r} \quad [\text{Éq. 2-3}]$$

Avec :

h_c : Coefficient de transfert thermique par convection.

h_r : Coefficient de transfert thermique par rayonnement.

T_a : Température de l'air ambiant.

T_{RM} : Température radiante moyenne (moyenne des températures des parois du local pondérées par leur surface respective).

2.2. Évaluation du confort thermique

2.2.1. Approche analytique

Dans les années 1970, FANGER [39] a déterminé expérimentalement les conditions physiologiques (température cutanée et transpiration) nécessaires au confort thermique dans des conditions thermiques homogènes et statiques. Cette méthode est à la base de la réglementation française (AFNOR, 2006).

FANGER a défini le PMV « Predicted Mean Vote » ou « Vote Moyen Prévisible » qui est un indice permettant d'évaluer le confort thermique.

$$PMV = [0,303.exp(-0,036.M) + 0,028].L \quad [\text{Éq. 2-4}]$$

L étant l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue, en W/m^2 , elle est définie par l'égalité :

$$L = M - W - E_{dif} - E_{rsw,req} - E_{res} - C_{res} - R - C \quad [\text{Éq. 2-5}]$$

Avec :

Q_{res} : flux de chaleur échangé par voie respiratoire en W/m^2

Q_{sk} : flux de chaleur échangé à la surface cutanée en W/m^2

C_{res} : flux de chaleur échangé par convection respiratoire en W/m^2

E_{res} : flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire en W/m^2

C : flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de peau en W/m^2

R : flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de peau en W/m^2

K : flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de peau en W/m^2

E_{sk} : flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de peau en W/m^2

Scr : taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps en W/m^2

Ssk : taux de chaleur stockée dans la peau en W/m^2

Le PMV est parfois appelé « échelle de perception thermique ASHRAE » (en anglais, ASHRAE thermal sensation scale). Cet indice représente l'avis moyen d'un groupe de personnes avec des facteurs individuels uniformes (habillement et métabolisme) dans un environnement thermique défini par la température sèche de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité de l'air et la vitesse d'air. Cette

échelle à 7 niveaux va de -3 à +3 (tableau 2-1), une valeur de PMV négative signifie qu'une majorité des occupants a plutôt froid et une valeur positive signale qu'ils ont chaud.

| | |
|-----------|------------------|
| +3 | chaud |
| +2 | tiède |
| +1 | légèrement tiède |
| 0 | neutre |
| -1 | légèrement frais |
| -2 | frais |
| -3 | froid |

Tableau 2-1. Echelle de perception thermique ASHRAE

La sensation de chaleur ne suffit pas à exprimer le confort. FANGER a proposé un autre indicateur PPD « Predicted Percentage Dissatisfied » ou « Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits » pour compléter la PMV. L'indice peut prédire le pourcentage d'insatisfaction face à un sentiment donné. Il correspond au pourcentage de personnes ne votant pas -1, 0 ou +1 (figure 2-2) sur l'échelle de perception thermique [40]. La relation entre le PMV et le PPD est donnée par :

$$PPD = 100 - 95 * e^{-(0,03353.PMV^4 + 0,2179.PMV^2)} \quad [\text{Éq. 2-6}]$$

Cet indice a été développé pour des applications en intérieur, et il prend en compte des principales variables climatiques, à savoir le degré d'isolation des vêtements et l'activité métabolique. Cependant, selon la forme originale définie par FANGER en 1970, l'hypothèse que toute la sueur s'évapore a été avancée. Cette hypothèse est incorrecte dans un climat tropical chaud et humide.

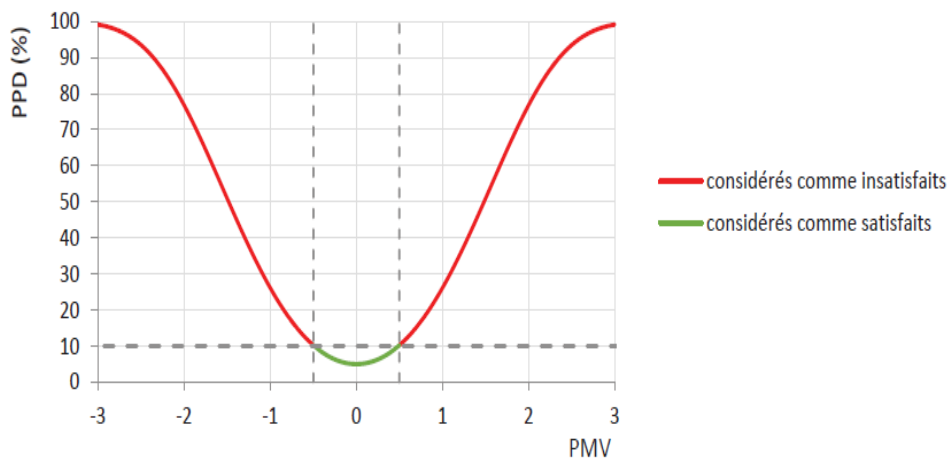


Figure 2-2. Répartition du pourcentage prévisible d'insatisfaits en fonction du vote moyen prévisible (de l'auteur)

Le modèle a été intégré dans les réglementations européennes (ISO 7730) et américaines (ASHRAE Standard 55). Mais il comporte des limites. En effet, ces indices ne sont valables que dans des limites bien précises, notamment une température d'air comprise entre 10 °C et 30 °C et une vitesse d'air comprise entre 0 et 1 m/s. Ces conditions d'utilisation ne sont pas représentatives des conditions rencontrées en climat chaud et humide. De plus, même dans ces conditions limites, l'analyse se base sur deux hypothèses restrictives, à savoir un régime permanent (pas de stockage de chaleur) et des

conditions environnementales uniformes. Ce qui est souvent irréalisable en extérieur, notamment lorsque le temps passé dehors est court ou si les conditions climatiques changent rapidement [41].

CANDAS [42] a expliqué qu'en général, les gens aiment être légèrement plus au chaud, ce qui signifie que lorsque $PMV = + 0,5$, le confort sera atteint, ce qui modifiera la courbe et la zone de confort. De même, le point d'insatisfaction change de manière asymétrique par rapport au point central. Il semble aussi que certaines personnes jugent mal s'il fait chaud ou froid, ce qui tend également à modifier la courbe précédente.

De plus, DE DEAR et BRAGER [43] ont montré que dans les bâtiments à ventilation naturelle, l'indice PMV surestime la sensation de chaleur en été et la sous-estime en hiver. Ce modèle ne parvient donc pas à déterminer les situations de confort dans ces conditions. Il reste cependant valide pour les bâtiments climatisés. MOUJALLED [44] a confirmé ces résultats au cours de sa thèse en étudiant des bâtiments en France.

GAGGE [45] a modélisé le corps humain comme deux compartiments concentriques, représentant le centre du corps et la peau. Ce modèle est une version simplifiée du modèle développé par STOLWIJK et HARDY pour la NASA [37]. Contrairement au modèle statique de FANGER, il s'agit d'un modèle dynamique capable de prédire des variables physiologiques dans des conditions instables. Dans la sortie du modèle, la température et l'humidité cutanées sont utilisées pour calculer l'indice développé par GAGGE (SET). Cet indice représente la température équivalente d'un environnement avec une humidité relative de 50%, dans laquelle un sujet portant des vêtements standards échangera la même chaleur et aura la même réponse physiologique que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Par conséquent, l'indice est lié au confort thermique.

2.3. Approche adaptative

Les méthodes adaptatives ne peuvent pas prédire le confort, mais peuvent déclencher des conditions physiologiques statiques, modifiant ainsi les conditions physiologiques et le confort ou l'inconfort personnel. La différence entre les résultats donnés par les indicateurs et les résultats d'enquêtes de terrain a conduit au concept de méthodes adaptatives.

Il s'agit d'une méthode empirique basée sur la température intérieure et extérieure et des enquêtes sur site. Dans ces enquêtes, les occupants utilisent des questionnaires pour évaluer la température lors des activités quotidiennes. Les votes des occupants sont généralement enregistrés dans des tables de vote de type ASHRAE ou Bedford.

DE DEAR et al. [46] ont défini trois catégories d'adaptations, comportementale, physiologique et psychologique. Les variables de l'ambiance intérieure et extérieure sont mesurées lors de ce type d'enquête. La réponse comportementale est presque instantanée. Elle peut être de deux types :

- celle par laquelle l'occupant s'ajuste à l'environnement pour améliorer son confort par changement de posture, déplacement, modification de sa vêtue et consommation de boissons chaudes ou froides,
- celle par laquelle l'occupant modifie son environnement thermique par ouverture/fermeture des fenêtres et des portes, action sur les occultations (stores, rideaux...), utilisation de l'éclairage artificiel, modification de la consigne de chauffage ou de climatisation et usage de ventilateurs.

Ces ajustements comportementaux jouent un rôle important dans l'acceptabilité des ambiances et le maintien du confort thermique. L'adaptation physiologique est la réponse du corps humain aux

changements de l'environnement thermique. Inconscient, il peut s'agir d'une origine génétique (mutation), ou il peut s'agir d'une séquence d'adaptation à l'environnement (modification du mécanisme physiologique après une exposition plus ou moins prolongée à un ou plusieurs stress thermiques). L'adaptation psychologique prend en compte la chaleur et le passé culturel de l'individu (par exemple, son habitude à être dans un environnement à une certaine température). LIU, YAO et McCLOY [47] montrent que pour un environnement thermique confortable, l'adaptation physiologique est la plus importante.

DE DEAR et al. [46] ont modélisé le confort adaptatif dans le cadre d'une étude américaine du projet ASHRAE RP-884. Il est désormais inclus dans la norme américaine (ASHRAE Standard 55-2004) pour définir le confort. Une autre étude européenne, dans le cadre du projet SCAT (Intelligent Control and Thermal Comfort), mis en œuvre par McCARTNEY et NICOL [48], a permis de modéliser le confort adaptatif. Il est désormais devenu la base de la réglementation européenne EN 15251 [49]. Ces deux réglementations diffèrent en termes de confort entre les bâtiments à ventilation naturelle et les bâtiments climatisés/chauffés. Le climat extérieur influe aussi grandement sur le comportement individuel. En hiver, les gens s'habillent plus et ont tendance à manger plus chaud. Le confort adaptatif relie donc la température intérieure de confort à la température extérieure qui peut être modulée avec celle des jours précédents.

McCARTNEY et NICOL [48] ont défini les équations suivantes en France pour déterminer les températures opératives intérieures optimales en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière sur sept jours (T_{RM7}). Pour être acceptable par près de 90% de la population, la température de confort doit se situer dans une zone de ± 3 degrés par rapport à la température de confort optimal.

$$\begin{aligned} \text{Pour } T_{RM7} < 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_c &= 0,049 * T_{RM7} + 22,58 \\ \text{Pour } T_{RM7} > 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_c &= 0,206 * T_{RM7} + 21,42 \end{aligned} \quad [\text{Éq. 2-7}]$$

Avec :

T_c : Température intérieure de confort optimal, $^\circ\text{C}$

T_{RM7} : Température extérieure en moyenne glissante journalière sur 7 jours, $^\circ\text{C}$

Pour le calcul de la température extérieure en moyenne glissante journalière sur sept jours (T_{RM7}), l'équation suivante peut être employée :

$$T_{RM7} = \frac{\theta_{-1} + 0,8.\theta_{-2} + 0,6.\theta_{-3} + 0,5.\theta_{-4} + 0,4.\theta_{-5} + 0,3.\theta_{-6} + 0,2.\theta_{-7}}{3,8} \quad [\text{Éq. 2-8}]$$

Dans laquelle θ_i est la θ du i ème jour précédent.

Dans la suite de notre étude, l'équation [Éq. 2-7] est utilisée comme méthode d'étude du confort thermique du bâtiment.

2.4. Les normes du confort thermique

Les normes permettent de définir les conditions du confort thermique des occupants dans les bâtiments. Plusieurs normes internationales sont utilisées pour la conception des bâtiments afin d'assurer un meilleur confort thermique durant les périodes de chauffage et de rafraîchissement. La norme ISO 7243 [34] propose une méthode simple basée sur le calcul d'un indice de WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) qui représente la contrainte thermique à laquelle un individu est soumis. La

méthode analytique de la norme ISO 7730 permet d'évaluer les ambiances thermiques en se référant aux indices PMV et PPD. Le tableau 2-2 présente les normes ISO qui traitent les ambiances thermiques [21].

| | <i>Norme</i> | <i>Titre</i> |
|-------------------|------------------------|--|
| Ambiance modérée | NF EN ISO 7730 | Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local (2005) |
| | NF EN ISO 10551 | Ergonomie des ambiances thermiques – Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs (Juin 2001) |
| | ISO 13732-2 | Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 2: Contact humain avec des surfaces à température modérée (2001) |
| Ambiance chaude | ISO 7243 (NF EN 27243) | Ambiances chaudes – Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir), (Février 1994) |
| | ISO 7933 (NF EN 12515) | Ambiances thermiques chaudes – Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de la sudation requise (Septembre 1997) |
| | ISO 13732-1 | Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 1: Surfaces chaudes |
| Ambiance froide | ISO 11079 | Évaluation des ambiances froides -- Détermination de l'isolement requis des vêtements (1993) |
| | ISO 13732-3 | Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 3: Surfaces froides (2005) |
| Normes de support | NF EN ISO 11399 | Ergonomie des ambiances thermiques – Principes et application des Normes internationales pertinentes (Mars 2001) |
| | NF EN ISO 7726 | Ergonomie des ambiances thermiques – Appareils de mesure des grandeurs physiques (Janvier 2002) |
| | NF EN ISO 9886 | Evaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques (Juin 2001) |
| | ISO 8996 (NF EN 28996) | Ergonomie – Détermination de la production de la chaleur métabolique (Février 1994) |
| | NF ISO 9920 | Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire (Juin 1995) |
| | NF EN ISO 12894 | Ergonomie des ambiances thermiques – Surveillance médicale des personnes exposées à la chaleur ou au froid extrêmes (Septembre 2001) |
| | NF EN ISO 13731 | Ergonomie des ambiances thermiques – Vocabulaire et symboles (Mars 2002) |

Tableau 2-2. Normes du confort thermique
de l'auteur

2.5. Zone de confort thermique

Le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le chercheur doit apporter les réponses nécessaires. Le confort thermique est très complexe en raison de l'interaction de plusieurs variables environnementales telles que, la température résultante sèche, l'humidité intérieure, la température de surface du plancher réversible et la vitesse de l'air intérieur.

Pour le confort d'hiver :

- La température d'air doit être comprise entre 16-20 °C pour une humidité de 40 et 60% (DTU 65.8) [50].
- La température superficielle maximale du plancher chauffant ne doit pas dépasser 28 °C en tout point du local pour une température intérieure de 19 °C (DTU 65.).

Pour le confort d'été :

- La température résultante sèche ne doit pas dépasser les 26 °C (ASHRAE).

La température de surface du plancher rafraîchissant doit être comprise entre 19 et 27 °C (ASHRAE).

On peut définir la plage du confort hygrothermique dans le diagramme inspiré de FAUCONNIER R. [51] et présenté sur la figure 2-3 où les zones 1,2 et 3 sont à éviter.

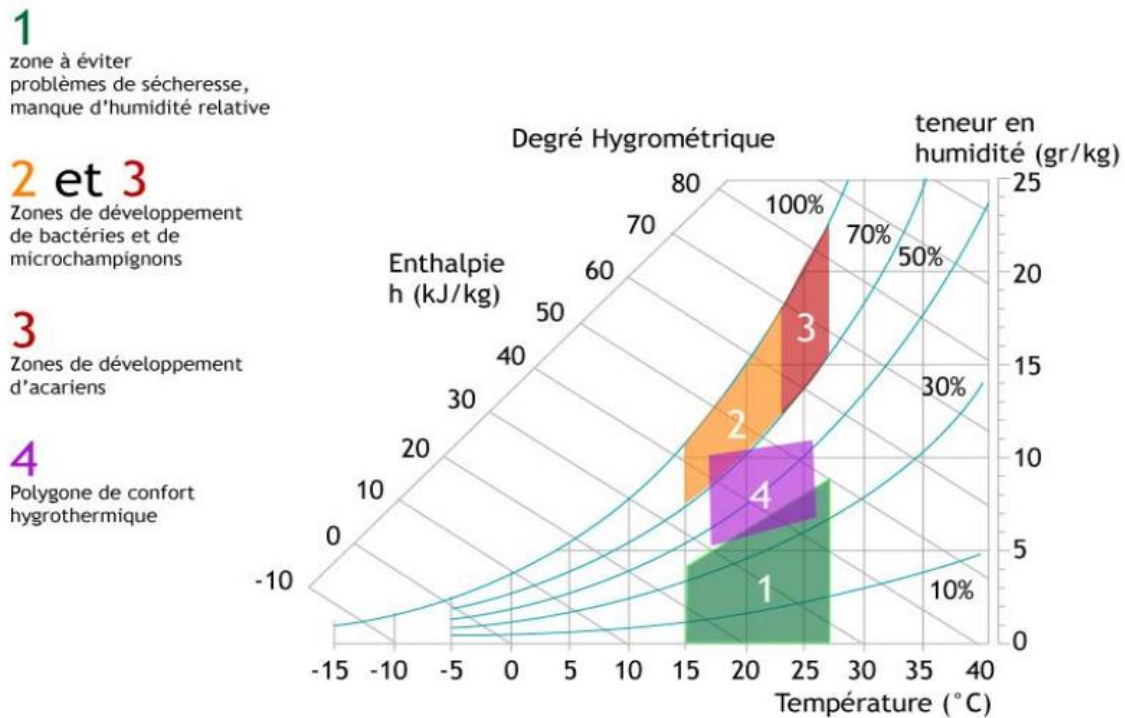


Figure 2-3. Diagramme du confort [51]

3. Le comportement de l'occupant

Le comportement de l'occupant est une des principales sources d'incertitude dans la prévision de la consommation d'énergie des bâtiments. Des études approfondies ont établi un lien entre les grands écarts de performance des bâtiments résidentiels ayant les mêmes propriétés et des conditions climatiques similaires ainsi que la manière dont les occupants interagissent avec l'enveloppe et les systèmes du bâtiment. En outre, au cours des dernières décennies, des réglementations énergétiques plus strictes ont conduit à des stratégies de conception à haut rendement énergétique dans le but d'atteindre l'objectif d'une consommation d'énergie proche de zéro. Le comportement des occupants a un impact direct sur la consommation d'énergie des bâtiments et sur le confort thermique comme l'ont montré numériquement de nombreuses recherches [52] [53].

CAYLA et al. [54] ont montré qu'en utilisant le même équipement technique, la consommation d'énergie peut changer trois fois en raison de la température de consigne et du taux de renouvellement d'air requis par les occupants. De ce fait, les consommations énergétiques ne sont plus celles prédites par les outils de simulations thermiques classiques. De même, les niveaux de confort peuvent varier, et parfois les comportements que l'occupant considère comme bénéfiques peuvent plutôt causer l'inconfort.

Une meilleure compréhension des interactions entre l'homme et le bâtiment permet de décrire avec une plus grande précision le comportement des occupants.

3.1. Modèle RT 2012 du comportement thermique de l'occupant

La RT 2012 [55] définit un scénario conventionnel du comportement de l'occupant en termes de température de consigne, de besoins d'ECS, d'éclairage, de ventilation, de gestion des occultations, de surventilation nocturne par ouverture des baies et des apports internes, selon le type du bâtiment et sa surface. En se limitant au bâtiment d'habitation, le scénario conventionnel de la RT 2012 prévoit deux semaines de vacances en août et une semaine en décembre.

Les températures de consigne en semaine sont fixées à 19 °C de 18h00 à 10h00 (occupation) et à 16 °C de 10h00 à 18h00 (inoccupation) en hiver, en mode de chauffage. En été, les températures de consigne sur les mêmes périodes de la journée sont fixées à 28 °C et 30 °C en mode de rafraîchissement. Le weekend, les températures de 19 °C l'hiver et de 28 °C l'été sont maintenues.

Pour l'éclairage, la puissance installée conventionnelle est de 14 W/m². 10% des points lumineux sont allumés simultanément de 7h00 à 9h00 et de 19h00 à 22h00 en semaine et de 7h00 à 22h00 le weekend.

Les apports internes de chaleur dans un bâtiment sont dus à l'occupant et aux équipements. Les apports internes de chaleur dus à la présence humaine sur une journée, en semaine, dans une maison individuelle de 90 m² habitable sont de 120 W pour deux personnes en sommeil de 22h00 à 6h00 et de 180 W en repos de 6h00 à 10h00 et de 18h00 à 22h00, le weekend les occupants sont présents. Les apports internes de chaleur dus aux équipements sont de 5,7 W/m² en situation occupation et 1,1 W/m² en situation inoccupation ou sommeil des occupants.

En période d'été, les ouvrants sont en position ouverte la nuit pour le rafraîchissement du bâtiment et les occultations sont en position fermée en journée de façon à s'affranchir des apports solaires.

3.2. Actions réelles de l'occupant dans le bâtiment

Plusieurs études sont effectuées pour évaluer l'impact de l'occupant vis-à-vis de la performance énergétique des bâtiments. Les principales actions sur le bâtiment par les occupants sont : ouverture/fermeture des ouvrants, réglage de la température, éclairage et consommation d'ECS.

3.2.1. Actions sur la consigne du système de chauffage/climatisation

La plupart des recherches sur les occupants qui modifient la température de consigne du chauffage ou de la climatisation sont menées dans le secteur résidentiel. En effet, dans les bâtiments de bureaux, la consigne est généralement ajustée automatiquement au niveau du système de production, de sorte que les occupants n'ont pas la possibilité d'ajuster la température.

En 2001, NICOL et al. [56] ont mené une analyse statistique basée sur des données expérimentales collectées sur 25 bâtiments de bureaux dans plusieurs pays européens et au Pakistan. Le but est d'établir la corrélation entre les différentes actions de l'occupant (le chauffage, les fenêtres, les stores, l'éclairage, et la ventilation) et la température extérieure pour créer un modèle de comportement aléatoire. La proportion des occupants à allumer leur radiateur auxiliaire varie linéairement de 0 à 100% lorsque la température extérieure passe de 15 °C à 5 °C. ANDERSEN et al. [57] ont mené une enquête de porte à porte sur 1600 résidences danoises. Ils ont constaté que la proportion de systèmes de chauffage allumés était liée à plusieurs variables, notamment la température intérieure, le rayonnement solaire, la qualité de l'air et le fait que l'occupant soit propriétaire ou non. Cependant, cela est contraire au résultat de CAO et al. [58] après avoir mené une enquête de terrain à Pékin, il a été constaté que les résidents qui peuvent ajuster la température interne de leur maison préfèrent augmenter l'isolement des vêtements plutôt que d'augmenter la température de consigne.

Après avoir analysé les rapports publics de l'Energy Information Administration (EIA), PEFFER et al. [59] relèvent de nombreuses statistiques sur l'utilisation des thermostats dans les logements individuels et collectifs. Ils ont souligné que 60% des logements équipés de thermostats programmables baissent leur température la nuit. Au cours de la journée, 45% des ménages interrogés ont déclaré qu'ils prévoyaient d'abaisser la température. La même étude a montré que pour 51% d'entre eux, ils étaient présents tout au long de la journée, ce qui explique la raison pour laquelle quelqu'un a baissé la température pendant la journée. 55% des répondants ont déclaré que pendant la saison de climatisation, ils augmentaient la température de consigne de la climatisation la nuit.

XU et al. [60] ont utilisé les statistiques d'une autre enquête américaine menée par EIA auprès de plus de 12000 bâtiments dans différentes villes des États-Unis sur la consommation d'énergie des bâtiments pour étudier les habitudes de réglage du thermostat. Ils ont défini 5 ensembles de « préférences chaudes » du froid au chaud. Ils ont créé ces groupes en divisant les statistiques en quintiles pour former des catégories de taille égale.

Leurs résultats montrent que lorsqu'une personne est à la maison, la température moyenne de consigne d'hiver pour les personnes qui aiment le froid est d'environ 18 °C, tandis que celle définie par les personnes qui aiment le chaud est de 23 °C. Pour la température de consigne de la climatisation en été, la différence entre les deux groupes est encore plus grande, respectivement 21 °C et 30 °C. Ils observent aussi que la température de consigne en hiver est plus faible en moyenne de 1 °C lorsqu'il n'y a pas d'occupant et qu'il n'y a quasiment pas de différence entre la consigne en occupation de jour et celle de nuit. La modification de la température est très liée à la modification de la tenue vestimentaire. Par exemple un occupant portant une tenue chaude en hiver ne nécessitera pas la même température de consigne de chauffage qu'un occupant plus légèrement vêtu. Une autre action de l'occupant liée au confort thermique et la consommation d'énergie est celle de gestion des occultations. Il s'agit d'un contrôle qui peut également entraîner des différences significatives de bilan énergétique selon la situation d'utilisation, car l'occupant réduit le gain solaire dans le bilan thermique lorsqu'il est déployé. En hiver, cela affectera la demande de chauffage ; en été, la climatisation seront nécessaire.

3.2.2. Actions sur les occultations

Les bâtiments à haute performance sont généralement conçus pour une utilisation précise des ouvertures et des protections extérieures. En hiver, il n'est pas prévu d'ouvrir les fenêtres et les volets extérieurs sont ouverts pendant la journée et fermés la nuit. Au contraire, en été, les fermetures extérieures doivent être fermées en journée, tandis que les fenêtres doivent être ouvertes la nuit pour favoriser le rafraîchissement nocturne et fermées en journée.

Les actions sur les occultations peuvent contribuer au confort visuel et impacter les consommations électriques d'éclairage. L'action des occupants sur l'éclairage lui-même a principalement été étudiée sur des bâtiments de bureaux dont les besoins d'éclairage sont majeurs par rapport aux bâtiments d'habitation (BONTE [61]).

Dans le cas particulier d'un bâtiment BEPOS de 137 m² habitable, 13 paramètres du comportement de l'occupant (ouverture volets, surventilation nocturne, puissances internes dissipées, etc.) ont été étudiés numériquement par 300 simulations [62]. Ces travaux de recherche ont mis en avant les indices de sensibilité des facteurs étudiés du comportement de l'utilisateur sur la température opérative du « salon » du bâtiment. Le risque d'inconfort réel est mis en évidence lié principalement aux apports solaires : le rôle majeur de l'occupant par sa gestion des occultations est souligné.

3.2.3. Actions sur l'ECS

Les bâtiments deviennent de plus en plus éco-énergétiques mais l'usage de l'eau chaude sanitaire (ECS) est un poste qui demeure fortement énergivore dans le résidentiel.

En 2012, d'après l'ADEME [63], l'eau chaude sanitaire (ECS) représentait 12,1% de la consommation d'énergie moyenne du logement, contre 61,3% pour le chauffage et 7% pour la cuisson. Les ballons d'ECS électriques sont les plus répandus avec des rendements médiocres de 70%, suivis des chauffe-eau gaz. Les chauffe-eau thermodynamiques et solaires sont de plus en plus utilisés tant en rénovation qu'en construction neuve, ceux-ci bénéficiant de crédit d'impôt pour la transition énergétique.

L'ADEME a lancé depuis 2009 un Programme d'Actions Concerté sur les Technologies Energétiques liées à l'eau chaude sanitaire (PACTE ECS). 15500 relevés annuels de compteurs et 400 suivis instrumentés ont ainsi été analysés :

- Les besoins journaliers moyens individuels d'ECS à 40 °C dépendent du taux d'occupation (80 ± 35 litres/personne pour un seul occupant à 45 ± 20 litres/personne pour 5 occupants par foyer).
- La consommation d'ECS dépend également de la température de l'eau froide et des systèmes d'économie d'eau (mitigeurs, thermostatiques, réducteurs de pression, limiteurs ou régulateurs de débit, douchettes économes, baignoires de plus faibles capacité...).

Une étude a été menée par CSOKNYAI et al. [64] sur les habitudes et les tendances de consommation d'énergie dans 150 foyers en France et en Espagne dont 42 maisons individuelles. Il en ressort que la consommation ECS est plus liée au nombre d'occupants plus qu'à la surface du logement avec des pics horaires au moment des repas et du coucher sans distinction des jours la semaine et les week-ends. L'énergie consommée pour l'ECS par occupant diminue avec le taux d'occupation en adéquation avec l'étude précédente de l'ADEME.

4. Conclusion

L'impact du comportement de l'occupant dans le bâtiment sur son confort thermique et les consommations énergétiques est un sujet largement développé depuis les années 1970 et qui reste d'actualité du fait de l'évolution des systèmes équipant les bâtiments et de changement de comportement.

Le confort de l'individu, propre à chacun, est évalué classiquement par deux approches (analytique et adaptative). De nombreuses recherches ont été menées sur les paramètres environnementaux (température de l'air, température de rayonnement, vitesse de l'air, humidité relative) et les paramètres individuels (vêtue et métabolisme) pour qualifier analytiquement la situation du confort. L'évaluation adaptative du confort définit une zone de confort autour de la température de confort optimale basée sur la température extérieure des sept jours antérieurs. Le confort tel que défini par l'équation [Éq. 2-7] sera utilisée dans la suite de l'étude pour l'évaluation du confort thermique du bâtiment.

Les actions de l'occupant sur la température de consigne, les ouvrants, les occultations, le puisage d'ECS et l'éclairage constituent les principales interactions sur le bâtiment visant à l'amélioration de son confort thermique. Ces actions peuvent induire des améliorations ou des altérations sur la consommation énergétique du bâtiment.

Le modèle conventionnel de comportement de l'occupant utilisé dans les outils de simulation thermique dynamique est considéré comme idéal et s'écarte des comportements réels des individus. L'intérêt de

ce modèle conventionnel est de permettre une caractérisation énergétique du bâtiment dans un environnement météorologique conventionnel selon la zone climatique et l'altitude.

Les parties suivantes présentent un bâtiment expérimental soumis au climat méditerranéen. L'objet concerne l'évaluation de l'impact du comportement de l'occupant sur ce bâtiment expérimental et ses équipements énergétiques. Des scénarios de comportement sont donc simulés en termes de gestion des volets, de la température de consigne et de la consommation d'ECS avec une acquisition fine de l'évolution du comportement énergétique du bâtiment dans le but d'une confrontation avec les scénarios conventionnels d'usage et météorologique.

CHAPITRE 3 : METHODE EXPERIMENTALE POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT DE L'USAGER

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 66 |
| 2. Le bâtiment expérimental | 66 |
| 2.1. Enveloppe | 67 |
| 3. Systèmes et équipements | 68 |
| 3.1. Le puits thermique | 69 |
| 3.2. La ventilation | 70 |
| 3.3. L'éclairage | 71 |
| 3.4. Le chauffage – Le rafraîchissement | 71 |
| 3.5. Le système photovoltaïque | 72 |
| 3.6. Le système ECS Solaire | 74 |
| 4. Système de gestion, de pilotage et de mesures | 77 |
| 4.1. Système KNX | 77 |
| 4.2. Système M-Bus | 84 |
| 4.3. Acquisition des données | 85 |
| 4.4. Données météorologiques | 88 |
| 5. Conclusion | 90 |

1. Introduction

Ce chapitre présente l'expérimentation d'un bâtiment au sein de l'IUT de Nîmes. Nous commencerons par décrire la structure du bâtiment. Nous passerons ensuite à la description des systèmes et des équipements installés pour assurer le chauffage, la climatisation, la ventilation, etc. ainsi que les systèmes de gestion, de pilotage et de mesures mis en place pour observer le comportement énergétique du bâtiment selon des scénarios d'usage du bâtiment par l'occupant. Ces scénarios d'usage (définis par pilotage et programmation) portent sur la température intérieure de consigne, la consommation d'ECS et la gestion des volets.

2. Le bâtiment expérimental

Localisé sur le site de l'IUT de Nîmes, le projet de conception et réalisation d'un bâtiment expérimental par les étudiants du département Génie Civil dans le cadre de leur projet de fin d'étude a débuté en 2009. Le projet initial portait sur l'isolation et l'équipement d'un « chalet de jardin », mais le projet a évolué vers la construction d'une « Cabane de Gardian » (figure 3-1) qui porte à la fois sur les formes traditionnelles des constructions camarguaises et le pilotage et l'analyse énergétique du bâtiment. L'idée de ce projet était de contribuer à la formation des étudiants vis-à-vis des moyens constructifs et techniques existants pour répondre au label bâtiment basse consommation et développement durable, d'être une vitrine du savoir-faire des étudiants du département Génie Civil de l'IUT de Nîmes pour apporter une solution possible et concrète au problème de l'efficacité énergétique du bâtiment.



Figure 3-1. Le bâtiment expérimental

Depuis 2017, le bâtiment est aussi un dispositif de recherche qui permet aux chercheurs du LMGC d'appréhender le comportement énergétique du bâtiment au sens large.

Le bâtiment a été conçu pour être accessible aux personnes à mobilité réduite : une rampe d'accès a été réalisée autour du bâtiment en respectant les règles de l'art. Un arbre métallique, support de quatre panneaux photovoltaïques a également été réalisé à l'extérieur en prenant les dispositions nécessaires (repose-pieds) pour que les personnes mal voyantes ne se blessent pas, tout en créant un espace de convivialité. Le bâtiment a une surface d'emprise totale de 20 m² répartie en deux pièces : un local technique qui accueille les équipements tels que la ventilation mécanique contrôlée double flux

(VMC DF) et le ballon d'eau chaude. La pièce de vie est dédiée à l'accueil des personnes et contient table, chaises, ordinateur et point d'eau.

La toiture a été récemment (juin 2019) recouverte en sur-toiture par du chaume dans le respect des constructions camarguaises traditionnelles, justifiant l'appellation initiale « Cabane de Gardian » de ce bâtiment expérimental.

Les données géographiques du lieu sont définies par le tableau ci-dessous :

| Lieu | Latitude | Longitude | Altitude |
|-----------|----------|-----------|----------|
| IUT Nîmes | 43,81° | 4,33° | 40 m |

Tableau 3-1 : Données géographiques du lieu

2.1. Enveloppe

Le bâtiment est en ossature bois. Les murs, les planchers bas et haut sont isolés par un isolant, le Métisse® (Annexe 6.1.1), conçu à partir de vêtements recyclés (exemple t-shirt et jeans). C'est une gamme d'isolation thermique et acoustique pour le bâtiment qui a été lancée par le Relais en 2007. Une fois les vêtements triés selon les matières, les textiles non réemployables en l'état sont défibrés puis transformés pour constituer des laines d'isolation très performantes et de haute qualité. Ce choix d'isolant a été fait pour respecter les trois piliers du développement durable que ce soit économique, social et environnemental.

2.1.1. Les Murs

Les murs sont en ossature bois et d'épaisseur 23,5 cm. Des plaques de Métisse d'une épaisseur de 15 cm, 60 cm de large et 120 cm de long pour les parois verticales (Figure 3-2) sont fixées entre les montants bois à l'aide d'agrafes tous les 15 cm. Un pare-vapeur Vario KM Duplex UV-Isover (Annexe 6.1.2) performant a été installé côté intérieur ainsi qu'une plaque de plâtre le séparant d'une lame d'air maintenue grâce au système Sisbox.

Le revêtement extérieur des murs est constitué d'un pare-pluie, d'une lame d'air et d'un calicot métallique enduit.



Figure 3-2. Isolation des parois par 15 cm de Métisse®

2.1.2. Le plafond

Pour l'isolation du plafond, des plaques d'isolant Métisse® d'une épaisseur de 20 cm, 60 cm de large et 120 cm de long (figure 3-3) afin d'avoir une isolation plus importante en plafond ont été installées. Elles sont fixées entre les fermettes par agrafage tous les 15 cm. Un soin particulier a été porté pour assurer la continuité du pare-vapeur.



Figure 3-3. Isolation du plafond par 20 cm de Métisse®

2.1.3. Le plancher

Le plancher du bâtiment est un plancher chauffant/rafraîchissant. Un serpentin de tuyaux d'eau de 1,4 cm de diamètre est clipsé sur des plaques à plots thermoformées (polystyrène) et noyé dans une chape (alimenté par une pompe à chaleur air-eau). Cet ensemble s'appuie sur une dalle béton de 10 cm d'épaisseur, elle-même reposant sur un média (sable + chaux) qui contient un échangeur sol-air.

Les fondations sont de dimensions de 20 cm de hauteur et 40 cm de largeur. Elles supportent un soubassement composé de trois rangs de BBM simples ainsi qu'une planelle armée. Un chaînage vertical a également été mis en place. Une dalle BA recouvre un massif stabilisé de sable et chaux dans lequel se trouve un puits thermique (échangeur sol-air).

2.1.4. Les vitrages

Deux petites fenêtres, de dimension 0,95 m x 0,85 m et orientées au sud, permettent un éclairage naturel des pièces et des apports solaires en hiver. Côté Est, la porte d'entrée de 2,10 m x 0,9 m, en bois contient un élément en double vitrage de surface 0,56 m². Les fenêtres sont en double-vitrages peu émissifs avec une lame d'Argon. Ce sont des vitrages très performants ($U_w = 1,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$). Les deux fenêtres sont équipées de volets roulants en PVC.

Le rapport des surfaces baies à la surface habitable du bâtiment (17,1 m²) est ainsi de 20%.

3. Systèmes et équipements

Le bâtiment est conçu pour pouvoir être (selon les consignes de température imposées) un bâtiment à énergie positive (BEPOS) dont le bilan énergétique global est positif, c'est-à-dire qu'il produit plus d'énergie qu'il n'en consomme. Sur cette base, des systèmes de production des énergies thermiques (PAC, Ballon ECS solaire) et électriques (panneaux P.V.) et des équipements à basse consommation d'énergie sont installés (figure 3-4). Des systèmes de gestion et de mesures de consommations et de production des énergies sont mis en place afin de programmer des scénarios de fonctionnement simulant le comportement de l'utilisateur. Cette méthodologie et ces technologies devront ainsi permettre d'évaluer

l'impact du comportement de l'individu sur le comportement énergétique du bâtiment mais aussi de caractériser énergétiquement chaque équipement.

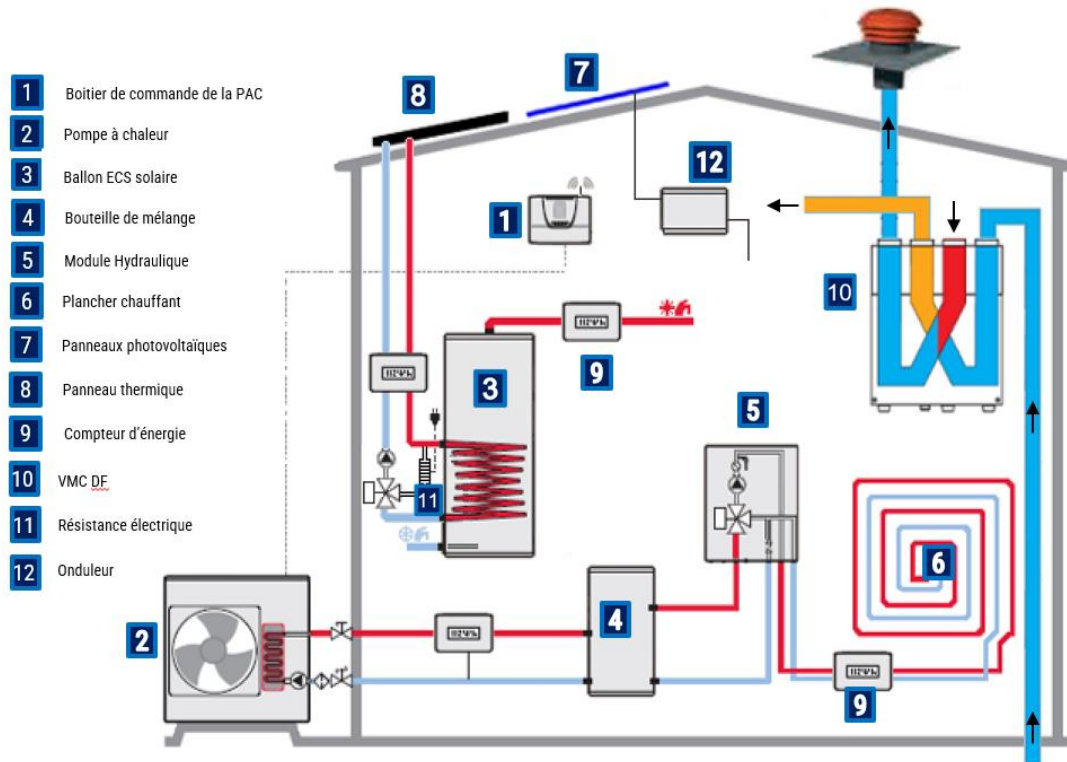


Figure 3-4. Systèmes et équipements du bâtiment

3.1. Le puits thermique

L'air neuf transite par un puits thermique en sous-face du bâtiment couplé à une VMC double flux de modèle DOMEO DF. Ce premier échangeur est constitué de 7 tubes en PVC parallèles et identiques de 8,6 m de longueur. Dans une couche de sol reconstituée (sable + chaux) de 60 cm, le puits thermique est positionné à la cote $Z = -0,320$ m par rapport à la surface du plancher (figure 3-5). La figure 3-6 présente un schéma de l'échangeur ; les tubes en bleu foncé sont de diamètre de 10 cm, et ceux en bleu clair sont de diamètre de 5 cm.



Figure 3-5. Installation du puits thermique en 2011

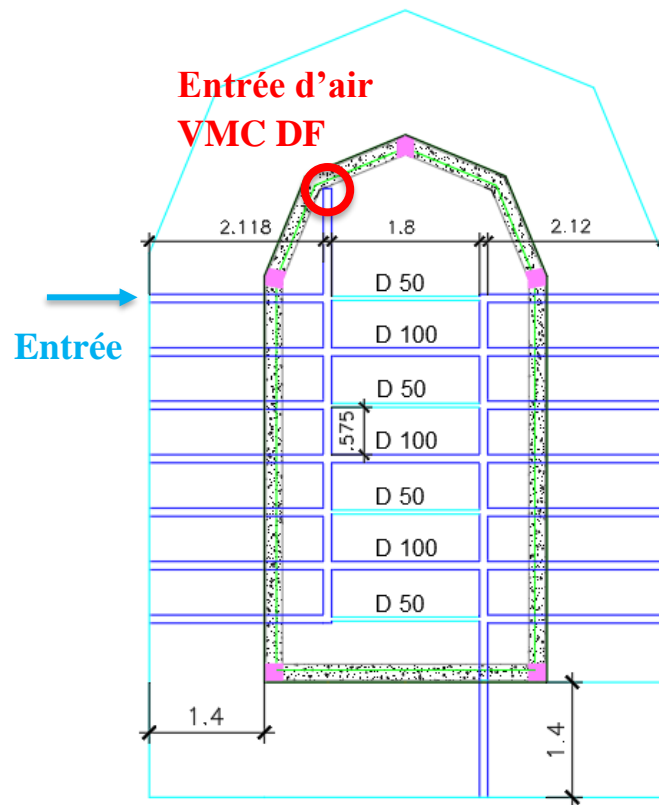


Figure 3-6. Schéma du puits thermique

Pour limiter les échanges de chaleur en périphérie du sous-bassement, 5 cm d'isolant Styrodur ont été placés sur toute la hauteur de la dalle jusqu'au terrain naturel. Les canalisations PVC du puits thermique ont été prolongées jusqu'aux parois latérales du sous-bassement avec des sorties débouchantes.

L'entrée d'air neuf dans le bâtiment s'effectue dans cette étude par la sortie débouchante du puits thermique la plus proche de la ventilation mécanique contrôlée installée dans le local technique pour une caractérisation de la VMC DF indépendante du puits thermique.

Bien que le puits thermique ne fasse pas partie de cette étude, sa conception permettra de réaliser des modèles différents d'échangeur en obturant un type de tuyau donné et d'étudier les transferts de chaleur entre le sol et l'air en passant dans les conduits voulus selon un circuit déterminé. La caractérisation de l'échangeur sol-air selon sa conception avec des circuits en parallèle ou non de diamètres 10 cm ou 5 cm sur la longueur choisie pourra alors être évaluée et modélisée. L'influence du débit pourra bien sûr être également étudiée.

3.2. La ventilation

Une VMC double flux autoréglable DOMEO 210 FL est installée dans le local technique pour renouveler l'air intérieur du bâtiment et permettre un échange d'énergie entre l'air neuf issu du puits thermique et l'air vicié extrait des pièces (figure 3-7).

Le principe de fonctionnement d'une VMC double flux est de filtrer et préchauffer (ou rafraîchir) l'air neuf grâce au transfert de calories présentes dans l'air vicié, dans un échangeur thermique à plaque à flux croisés sans mélange. L'air neuf est donc préchauffé (en hiver) induisant une réduction de la dépense énergétique du chauffage de l'habitation relative au renouvellement d'air. Ainsi la VMC double

flux permet d'assurer une grande qualité de confort intérieur par un soufflage d'air neuf propre à une température voisine de l'air intérieur.



Figure 3-7. VMC DF du bâtiment

Grâce à l'échangeur haute efficacité de la VMC DOMEO le rendement annoncé par le constructeur peut atteindre 92% (Annexe 6.2.1). En outre, la VMC est équipée d'un système de by-pass 100% permettant de rafraîchir le bâtiment en soufflant l'air neuf extérieur en été (lorsqu'il est plus frais que l'air intérieur) directement dans le bâtiment sans passer par l'échangeur. La VMC est reliée à une boîte de commande qui permet de piloter le débit de base (min et max), le débit d'absence, la fonction Boost temporisée 1/2h et de forcer manuellement le by-pass. Pour le bâtiment expérimental, le débit d'air est réglé à 120 m³/h pour le débit max et 60 m³/h pour le débit min.

Un module KNX (Zennio Minibox 45 – décrit dans la partie 4.1.4) est connecté à la VMC afin de la piloter à distance en faisant varier le débit d'air et/ou en introduisant des conditions spécifiques (sur l'humidité intérieure, le taux de CO₂ et les températures intérieure et extérieure) pour passer d'un débit à un autre ou en mode by-pass.

3.3. L'éclairage

Le bâtiment expérimental est entièrement équipé de lampes LED. Les ampoules LED sont placées dans des spots classiques acceptant des culots GU10, comme la plupart des halogènes.

Cinq spots de puissance 26,5 W sont installés dans la pièce de vie et un luminaire de 42 W a été fixé dans le local technique.

3.4. Le chauffage – Le rafraîchissement

Le chauffage et le rafraîchissement du bâtiment expérimental sont assurés par une pompe à chaleur (PAC) air/eau monobloc réversible GENIA AIR 6 - SAUNIER DUVAL (Annexe 6.2.2) (figure 3-8). La pompe à chaleur air-eau est constituée d'un module placé à l'extérieur du bâtiment dans lequel un fluide frigorigène transfère la chaleur prise sur l'air extérieur à une bouteille de stockage de 50 l qui alimente le plancher chauffant/rafraîchissant bi-zones contrôlé par un module hydraulique (figure 3-9).

Le boîtier de commande est installé à l'intérieur du bâtiment pour définir la température intérieure de consigne visée.



Figure 3-8. Pompe à chaleur

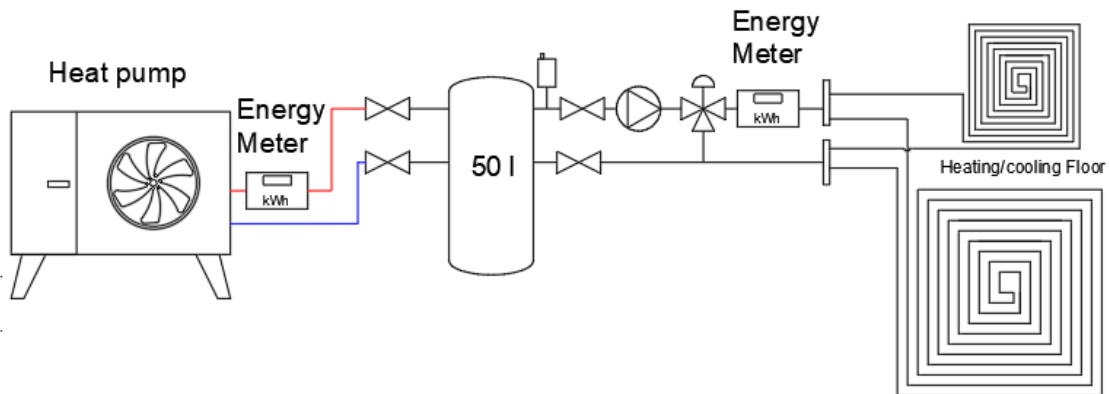


Figure 3-9. Schéma de l'installation du chauffage/rafraîchissement

| Description | Unité | Genia Air 6 |
|---|-------|-------------|
| Caractéristiques avec plancher chauffant | | |
| Départ : 35 °C, retour : 30 °C, température sèche (humide) : 7 °C | | |
| Puissance chauffage | kW | 5.8 |
| Consommation électrique nominale | kW | 1.38 |
| COP* A7(6) W35-30 | | 4.20 |
| Caractéristiques en rafraîchissement | | |
| Départ : 7 °C, retour : 12 °C, température sèche 35 °C | | |
| Puissance frigorifique | kW | 4.7 |
| Consommation électrique nominale | kW | 1.6 |
| EER** A35 W7-12 | | 2.91 |

Tableau 3-2. Caractéristiques de la pompe à chaleur en mode chauffage et rafraîchissement

3.5. Le système photovoltaïque

Une installation photovoltaïque YL250P-29b de puissance crête 1,5 kWc est installée en toiture et sur une structure porteuse à proximité du bâtiment expérimental. L'énergie produite est mise aux normes du réseau par un onduleur SUNNY-BOY, puis auto-consommée ou reversée sur le réseau électrique de l'IUT (figure 3-10).

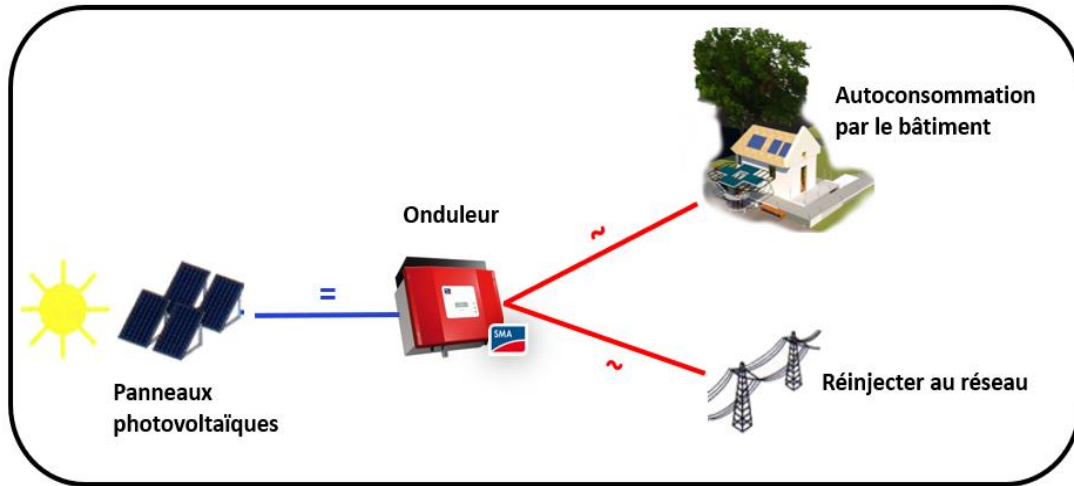


Figure 3-10. Schéma de l'installation photovoltaïque

3.5.1. Les panneaux photovoltaïques

Six modules photovoltaïques YINGLI SOLAR - Yingli YGE 60 cell 40mm série 1 - YL250P-29b (Annexe 6.2.3) sont installés, deux sur la toiture du bâtiment et quatre sur l'arbre métallique, orientés sud avec un angle d'inclinaison respectivement de 45° et 15°. Ces panneaux sont des PV multicristallins, d'une puissance totale de 1,5 kWc. Le branchement des panneaux solaires est effectué en série en respectant le principe d'équipotentialité avec une prise de terre et en évitant les boucles d'induction.



Figure 3-11. Deux panneaux solaires photovoltaïques installés sur le versant SUD de la toiture du bâtiment, d'inclinaison 45°

3.5.2. Onduleur

L'onduleur convertit le courant continu des panneaux photovoltaïques installés en courant alternatif identique à celui du réseau. L'énergie solaire produite est ou bien autoconsommée par le bâtiment ou bien réinjectée au réseau électrique de l'IUT. L'onduleur de marque SMA Solar Technology et de type SONNY BOY 1200 est installé dans le local technique.



Figure 3-12. Onduleur installé dans le bâtiment

3.6. Le système ECS Solaire

Le système de production d'eau chaude sanitaire solaire dans le bâtiment expérimental est constitué d'un capteur solaire thermique HELIO PLAN - SRD 2.3 relié à un ballon solaire SAUNIER DUVAL - HELIOSET – FES1 250 BiDE avec un appoint électrique d'une résistance de puissance de 2.5 kW.

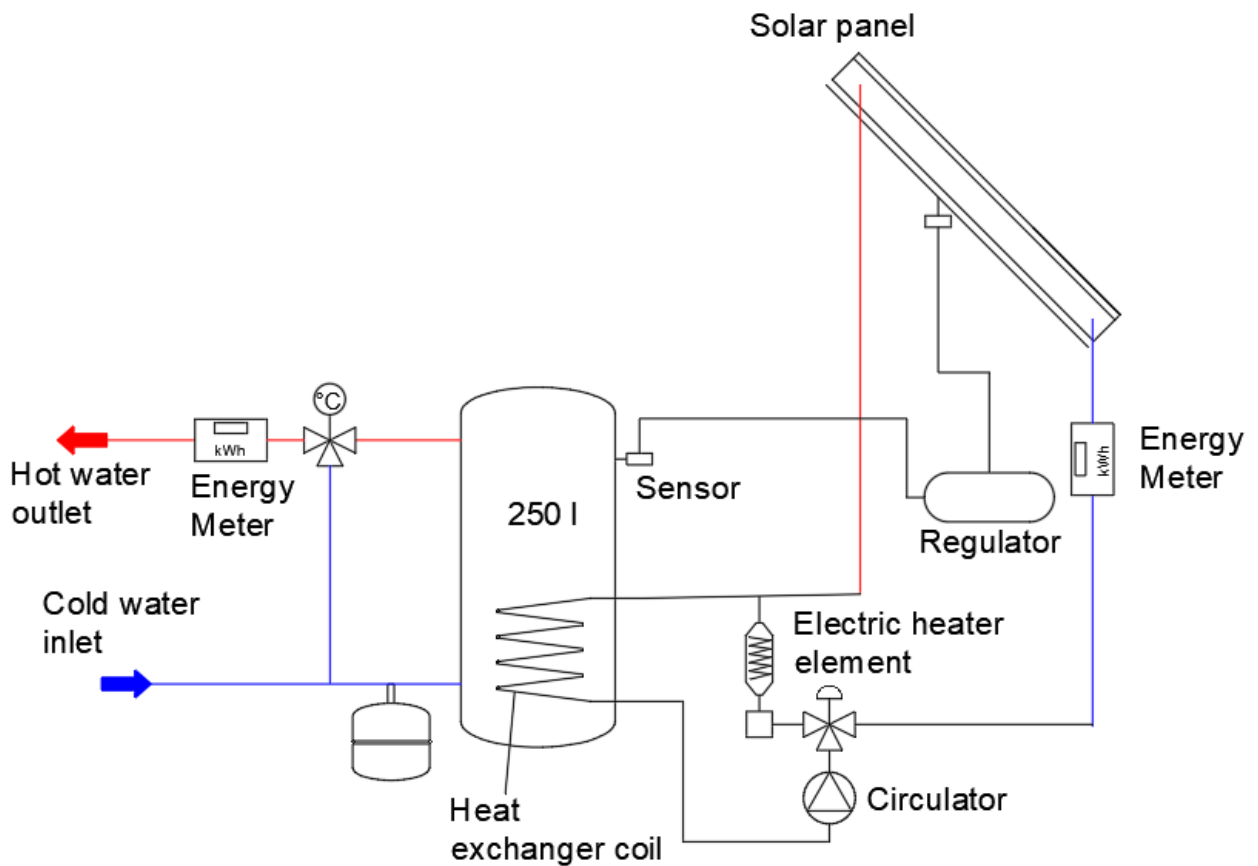


Figure 3-13. Système de production d'ECS

3.6.1. Capteur solaire

Le capteur solaire, de marque SAUNIER DUVAL et de type SRD 2.3 (Annexe 6.2.4) est installé sur le versant sud de la toiture d'inclinaison 45°.



Figure 3-14. Capteur Solaire HELIO PLAN - SRD 2.3

| Description | Unité | SRD 2.3 |
|---|-------------------------------------|-----------|
| Absorbeur | | Serpentin |
| Surface absorbeur | m ² | 2.35 |
| Absorptivité de l'absorbeur (a) | % | 95 |
| Emissivité de l'absorbeur (s) | % | 5 |
| Rendement optique η_0 | % | 80.1 |
| Coefficient linéaire de transfert thermique k1 | W/(m ² .K) | 3.76 |
| Coefficient quadratique de transfert thermique k2 | W/(m ² .K ²) | 0.012 |
| Température maximale | °C | 170 |
| Puissance maximale | kW | 1.88 |

Tableau 3-3. Caractéristiques du capteur solaire SRD 2.3

3.6.2. Ballon de stockage

Le ballon installé dans le bâtiment expérimental est de marque Saunier Duval et de type HelioSet 250 (Annexe 6.2.5). La température maximale du ballon est 85 °C (réglable) et la température de consigne est réglée au-dessus de 50 °C pour se protéger de la légionellose.

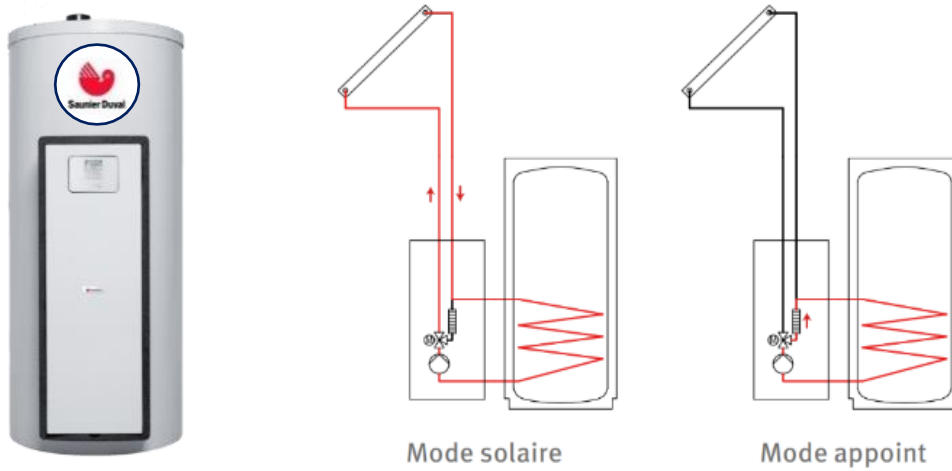


Figure 3-15. Photo et schémas de fonctionnement du ballon ECS

| Ballon HelioSet auto vidangeable | FE S1 250 BiDE | |
|--|-----------------------|-------|
| Classe d'efficacité énergétique | B | |
| Capacité réelle du ballon | litres | 250 |
| Température max de l'eau dans le ballon | °C | 85 |
| Constance de refroidissement Cr | Wh / (jour.l.K) | 0,128 |
| Pertes thermiques ua | W / K | 1,36 |
| N° de zone de régulation | 3 | |
| Hauteur relative de l'échangeur % | 51 | |
| Surface d'échange | m ² | 1,3 |
| Volume du fluide solaire | litres | 8,9 |
| Température max du fluide solaire | °C | 130 |
| Puissance de l'appoint électrique | kW | 2,5 |
| Puissance max absorbée (hors appoint électrique) | W | 75 |
| Puissance nominale de la pompe | W | 36,5 |

Tableau 3-4. Caractéristiques du ballon ECS

4. Système de gestion, de pilotage et de mesures

Un bâtiment instrumenté est un bâtiment qui utilise la technologie pour partager les informations techniques concernant les systèmes et les équipements afin d'optimiser la performance énergétique du bâtiment, et notamment celle propre au confort de l'occupant. Ces informations peuvent être utilisées pour automatiser divers processus : du chauffage, de la climatisation, de la ventilation et de la sécurité. Les systèmes d'automatisation des bâtiments de pointe tels que KNX, BACnet, ZigBee et M-Bus sont basés sur des réseaux de contrôle utilisés principalement pour des scénarios de contrôle local.

Dans ce bâtiment expérimental, deux systèmes de communication sont utilisés : KNX et M-Bus. Ces systèmes permettent l'automatisation du bâtiment pour assurer le confort et la gestion de l'énergie du bâtiment. Le bâtiment expérimental permet ainsi d'assurer en autonomie, émission, réception et stockage des données.

4.1. Système KNX

KNX [65] est un protocole de communication normalisé pour les bâtiments connectés. Il existe depuis 1999 et décrit comment les capteurs et les acteurs peuvent communiquer entre eux. KNX est le successeur de trois normes précédentes : European Home Systems Protocol (EHS), BatiBUS, et European Installation Bus (EIB ou Instabus). Il est conforme aux normes EN 50090, EN 13321-1 et ISO/ IEC 14543.



Figure 3-16. Système KNX

Les dispositifs KNX peuvent gérer l'éclairage, les stores et les volets, la climatisation, les systèmes de sécurité, la gestion de l'énergie, l'audio vidéo, les produits blancs (électroménager), les écrans, la télécommande, etc. KNX fonctionne en garantissant que tous les composants, dispositifs, caractéristiques et fonctions de tout bâtiment (ou espace extérieur) communiquent via un langage commun instantanément et à distance.

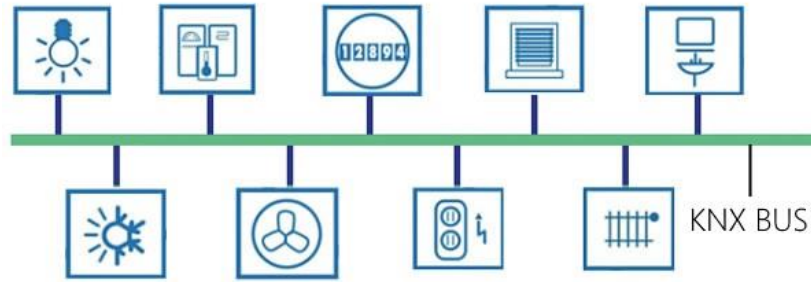


Figure 3-17. Différents systèmes compatibles avec le système KNX

Les différents éléments de la technologie du bâtiment sont connectés les uns aux autres par une ligne de bus KNX principale, conformément à la norme KNX pour l'automatisation des bâtiments. Le système de câbles est alors relié à des éléments tels que des capteurs, des détecteurs, des paramètres, etc. qui peuvent ensuite être contrôlés de manière pratique par les utilisateurs finaux à l'aide d'un ordinateur portable, d'un smartphone ou d'une tablette. Les capteurs (boutons poussoirs, thermostats, anémomètres, mouvement, etc.) recueillent des informations et les envoient sur le bus sous forme de télégramme de données. Les actionneurs (gradateurs, vannes de chauffage, écrans) reçoivent ces télégrammes de données qui sont ensuite convertis en actions.

L'installation d'un système KNX est coûteuse, surtout dans les bâtiments déjà construits : de nouveaux câbles et conduits doivent être installés dans les murs à chaque point de commutation.

Le choix d'utilisation du système KNX s'est effectué pour plusieurs raisons mais principalement par le fait que KNX est une norme mondiale ouverte avec plus de 300 fabricants différents qui produisent des produits qui fonctionnent tous entre eux et ensemble de manière transparente. De plus, le câblage est négligeable pour un bâtiment de cette taille.

4.1.1. Capteur de température, d'humidité et de CO₂ de l'air intérieur

La température, l'humidité et le taux de CO₂ de l'air intérieur du bâtiment expérimental sont mesurés par le capteur AMUN 716 KNX. Il est utilisé pour surveiller la qualité de l'air dans la pièce vie du bâtiment. La fréquence des mesures des trois paramètres est de 10 min.

Des messages d'alertes sont programmés afin de maintenir le confort.

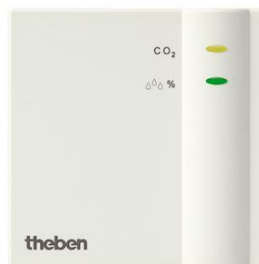


Figure 3-18. Capteur de température, humidité et CO₂

Caractéristiques

- Alimentation électrique : tension du bus
- Consommation de courant du bus : max. 10 mA
- Température ambiante : -5 °C ... +45 °C
- Plage de mesure, CO₂ : 300 - 9999 ppm

- Plage de mesure, température : 0 °C ... +40 °C
- Plage de mesure, humidité : linéaire 20% ... 100%
- Type de protection : IP 20 selon la norme DIN EN 60529
- Dimensions : 74x74x31 mm.

4.1.2. Compteur d'énergie électrique

Le compteur d'énergie électrique « Zennio – Kes plus » pour systèmes monophasés permet de mesurer et transmettre au système KNX, non seulement l'énergie consommée ou produite (kWh), mais aussi le coût associé selon 6 tarifs différents, les émissions de CO₂, la puissance active et réactive, le facteur de puissance et d'autres informations concernant l'utilisation de l'énergie électrique dans l'immeuble. De plus, il dispose de 10 fonctions logiques pour une plus grande versatilité dans les automatisations KNX. Les mesures sont effectuées par des transformateurs de courant ZN1AC-CST60 branchés sur le conducteur de phase de chaque équipement.

Trois Kes-plus sont installés dans le tableau électrique du bâtiment, chacun équipé de 3 transformateurs afin de relever les énergies électriques consommées par la PAC, la VMC, le Ballon ECS, les prises électriques, les éclairages, les volets, le module hydraulique et l'énergie passant par l'alimentation principale du bâtiment mais aussi l'énergie électrique produite par les panneaux solaires photovoltaïques. Toutes ces données permettent l'évaluation du bilan électrique du bâtiment. L'intervalle des mesures des énergies est fixé à 30 minutes.



Figure 3-19. Compteur électrique Kes-plus avec un transformateur

Caractéristiques

- Mesure des principales grandeurs électriques.
- Adéquat pour des installations triphasées ou monophasées (3 lignes).
- Mesure de puissance (kW ou W) et énergie sous 3 registres.
- Registres d'estimations d'émissions de CO₂ et de coûts.
- Permet la synchronisation avec une horloge du système KNX.
- Sauvegarde complète des données en cas de panne du bus KNX.
- Dimensions 67 x 90 x 35mm (2 unités de rail DIN).
- Conforme aux directives CE (marque CE du côté droit).

4.1.3. Actionneur de Volets

L'actionneur de volets roulants, système de bus à 2 canaux JRA/S2.230.5.1, commande jusqu'à deux moteurs de volets roulants ou de stores ou volets de ventilation, avec commande manuelle possible,

comprend une détection automatique de la course, avec indication par LED, et est monté sur DRA. Il fonctionne sous courant nominal max. 6A, tension nominale max. 230 V AC, de caractéristique IP2. Un actionneur pilote les 2 volets électriques du bâtiment.



Figure 3-20. Actionneur de volet

Caractéristiques

- Système de bus KNX : oui
- Largeur en unités de division : 4
- Courant de commutation charge résistive : 6 A
- Capacité de commutation max. : 2400 W
- Nombre max. de sorties aveugles : 2
- Dimensions 64.5 x 90 x 72mm (4 unités de rail DIN).

4.1.4. Contrôle d'éclairage

Zennio - MINiBOX 45 est un actionneur KNX polyvalent qui permet une grande variété de fonctions. Il dispose de 4 sorties 16A C-Load qui offrent un paramétrage multiple comme canaux de volet, sorties individuelles.

Il permet le contrôle manuel à travers des appuis et inclut un module de fonctions logiques. Il dispose de 5 entrées analogiques-numériques qui peuvent être paramétrées comme entrées binaires multifonctions, pour capteurs et boutons poussoirs libres de potentiel, comme entrées de sondes de température ou comme entrées de capteurs de mouvement, ainsi que quatre thermostats de zone pour le contrôle de circuits froid/chaud. Accessoires : Sondes de température, capteur de mouvement et adaptateurs de volet AC/DC. Deux MINIBOX 45 sont installés dans le tableau électrique du bâtiment afin de piloter les éclairages et les débits de la VMC double flux.



Figure 3-21. Minibox 45 – Actionneur

Caractéristiques

- 4 sorties configurables comme :
 - 2 canaux de volet
 - 4 sorties individuelles
- 5 entrées analogiques/numériques.
- Inclut des fonctions logiques.
- Temporisation sur les sorties.
- Sauvegarde des données complètes en cas de perte d'alimentation.
- Possibilité de connexion de différentes phases sur les sorties voisines.
- Conforme aux directives CE

4.1.5. Capteur de température

Zennio – QUAD PLUS, module de 4 entrées analogiques-numériques qui peuvent être configurées comme entrées binaires multifonction, pour capteurs et boutons poussoirs libres de potentiel, comme entrées de sondes de température ou entrées de capteurs de mouvement. Sont inclus 4 thermostats de zone pour le contrôle de circuits de froid/chaud. 2 modules QUAD PLUS sont installés dans le bâtiment couplé à 6 sondes de températures.



Figure 3-22. Capteur de températures

Caractéristiques

- 4 entrées analogiques/numériques configurables comme :
 - Entrée binaire.
 - Sonde de température (NTC avec courbe personnalisable).
 - Capteur de mouvement.
 - 4 thermostats.
- Type de montage : Montage mural
- Sauvegarde complète des données en cas de perte d'alimentation.
- Pas besoin d'alimentation différente à celle du bus.
- Conforme aux directives CE.
- Dimensions : 39 x 39 x 14mm.

4.1.6. Détecteur de présence et de luminosité

Le détecteur de présence thePrema P360 KNX commute ou régule trois groupes d'éclairage en fonction de la présence de personnes et de la luminosité actuelle. L'éclairage s'allume en cas de présence et en cas de luminosité insuffisante. Il s'éteint en cas d'absence ou de luminosité suffisante. L'éclairage peut être commuté ou varié manuellement à l'aide d'un bouton-poussoir. Lorsque la régulation à lumière constante est commutée, la luminosité est maintenue constante à la valeur de consigne de la luminosité.



Figure 3-23. Détecteur de présence

La régulation est démarrée automatiquement ou manuellement via le bouton-poussoir. 2 canaux supplémentaires peuvent transmettre les informations de présence dans la pièce à des unités supplémentaires telles que les commandes de chauffage, de ventilation, de climatisation ou de store. Chaque canal dispose d'une temporisation à l'enclenchement ainsi que d'une temporisation au déclenchement. Un autre canal sert à surveiller la pièce, la présence de personnes est signalée avec une grande certitude. En association avec la commande à distance, le détecteur de présence est en mesure d'effectuer la commutation et la variation des groupes d'éclairage, mais également la commande des consommateurs externes supplémentaires, tels que la lumière, les stores, etc.

4.1.7. Capteur de Luminosité et température extérieure

Le capteur LU 131 S mesure la température et la luminosité extérieures. Il est installé sur le versant nord de la toiture.



Figure 3-24. Capteur de luminosité et température extérieure

Caractéristiques

- Tension de service KNX : Tension du bus, ≤ 5 mA
- Type de montage : Montage mural
- Type de raccordement : Borne de BUS KNX
- Plage de mesure de la luminosité : 1 – 100000 lx
- Plage de mesure de la température : -20 °C ... +55 °C
- Température ambiante : -25 °C ... +55 °C
- Indice de protection : IP 54

4.1.8. Interface IP / KNX

Une Interface IP / KNX Siemens est installée dans le bâtiment expérimental pour faire la connexion entre le réseau IP de l'IUT et tous les modules KNX installés dans le bâtiment.

L'Interface IP / KNX Siemens utilise le standard KNXnet/IP et effectue l'interfaçage entre le bus KNX/EIB et les réseaux de données qui utilisent le protocole Internet (IP). Elle permet d'accéder au bus KNX/EIB via un PC ou tout autre terminal de traitement de données :

- La connexion Ethernet s'effectue via une prise RJ45
- L'alimentation externe se fait par une alimentation TBTS 24Vcc via une borne dédiée

Pour la configuration des éléments KNX, le logiciel utilisé est ETS4. Il permet de créer, concevoir et tester des projets KNX. ETS4 permet de coordonner l'utilisation de composants compatibles KNX : capteurs de températures, MiniBox, gestionnaire de volets, détecteur de présence, etc. L'avantage de cette plate-forme est que ces composants peuvent être configurés individuellement ou en groupes ou croisés. Le nombre de composants pouvant communiquer avec le bus KNX est illimité.

Les données [66], [67] ont une identification unique composée de deux nombres. Le premier nombre indique le format et le codage. Le deuxième représente la plage de valeurs et l'unité.

Type de données : format + codage

Taille : plage de valeurs + unité

Notation : X.YYY

X : définit le format + le codage

YYY : définit la plage de valeurs + l'unité

Types de points de données les plus fréquemment utilisés :

- 1.yyy = booléen, comme commutation, monter/descendre, étape
- 2.yyy = 2 x booléen, p. ex., commutation + contrôle de priorité
- 3.yyy = booléen + valeur non signée 3 bits, p. ex., augmenter/diminuer atténuation
- 4.yyy = caractère (8 bits)
- 5.yyy = valeur non signée 8 bits, comme valeur d'atténuation (0...100%), position de stores (0...100%)
- 6.yyy = complément à deux 8 bits, p. ex.,%
- 7.yyy = 2 x valeur non signée 8 bits, p. ex., compteur d'impulsions
- 8.yyy = 2 x complément à deux 8 bits, p. ex.,%
- 9.yyy = flottant 16 bits, p. ex., température
- 10.yyy = heure
- 11.yyy = date
- 12.yyy = 4 x valeur non signée 8 bits, p. ex., compteur d'impulsions
- 13.yyy = 4 x complément à deux 8 bits, p. ex., compteur d'impulsions
- 14.yyy = flottant 32 bits, p. ex., température
- 15.yyy = contrôle d'accès
- 16.yyy = chaîne -> 14 caractères (14 x 8 bits)
- 17.yyy = numéro de scène
- 18.yyy = contrôle de scène
- 19.yyy = heure + données
- 20.yyy = énumération 8 bits, p. ex., mode HVAC (« auto », « confort », « veille », « économie », « protection »).

Sur le réseau informatique de l'IUT, nous avons installé un outil dénommé Node-Red (décrit dans la partie dédiée) qui se connecte à l'interface IP/KNX et permet via une programmation la lecture des données issues des capteurs pour les rendre exploitables.

4.2. Système M-Bus

Le choix de compteurs d'énergie connectés à ultrason est basé sur le principe d'utilisation des compteurs connectés à distance, dont les mesures peuvent être lues et transférées. En plus, la technologie ultrasons permet d'avoir une mesure statique du temps. Elle présente plusieurs avantages : aucune pièce en mouvement, faible perte de charge, faible débit de démarrage, dynamique de mesure importante, insensibilité aux particules en suspension.

Quatre compteurs d'énergie Sharky 775 et Ultramax Itron sont installés sur les circuits hydrauliques afin de mesurer la consommation d'énergie du système de chauffage/climatisation et d'eau chaude sanitaire consommée et l'énergie produite par le système solaire de production d'ECS.

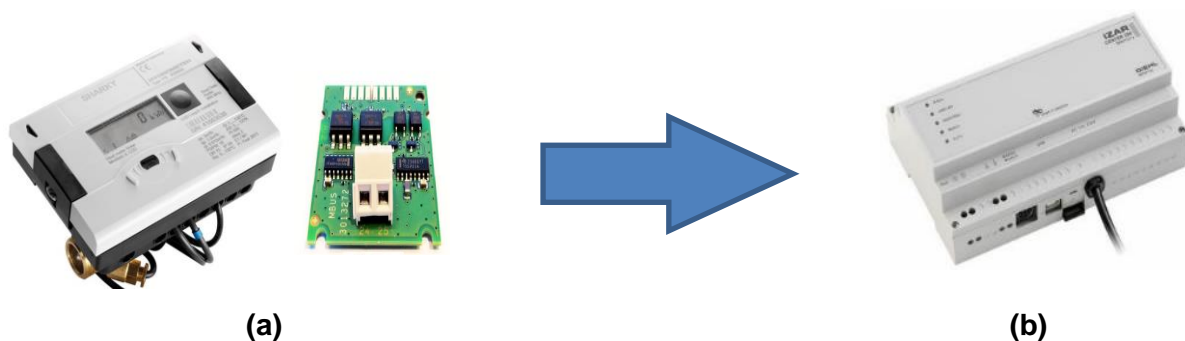


Figure 3-25. Compteur d'énergie Sharky 775 et carte M-Bus (a), Centrale d'acquisition IZAR CENTER (b)

Les compteurs sont reliés par le protocole M-Bus à la centrale d'acquisition IZAR CENTER qui permet de relever à distance les mesures. IZAR CENTER interroge et mémorise automatiquement les informations des compteurs qui lui sont raccordés. Elles peuvent être relevées soit par un PC via une liaison RS232, USB ou LAN, soit par un modem analogique ou GSM. IZAR CENTER peut être programmé pour envoyer automatiquement les informations à une cadence définie et avertir par SMS ou mail tout déclenchement d'alarme.

IZAR CENTER envoie une requête aux compteurs équipés d'une carte de communication M-Bus. Cette action peut être initialisée manuellement par l'utilisateur ou automatiquement par IZAR CENTER. Du fait d'une capacité limitée par la centrale d'acquisition IZAR CENTER, pour disposer de mesures précises et d'une fréquence réduite, le système M-Bus (IZAR CENTER+ COMPTEURS) est connecté au « node-red » (décrit dans la partie dédiée) par des « nodes » qui permettent d'interroger les compteurs et stocker les données à la fréquence souhaitée (1 min).

Les mesures d'énergie par les compteurs Sharky sont définies au kWh près permettant d'évaluer les énergies consommées et fournies des systèmes équipés. Cela induit une limitation des durées minimales étudiées à une journée. Ainsi, les analyses d'énergies de ces systèmes s'effectueront donc sur des durées hebdomadaires au minimum.

4.3. Acquisition des données

Le système d'acquisition du bâtiment est installé, afin d'être accessible aux étudiants durant des travaux pratiques et des projets, sur l'analyse énergétique des équipements et du bâtiment mais aussi aux chercheurs du LMGC de Montpellier pour les projets de recherche dans le domaine de l'énergie du bâtiment.

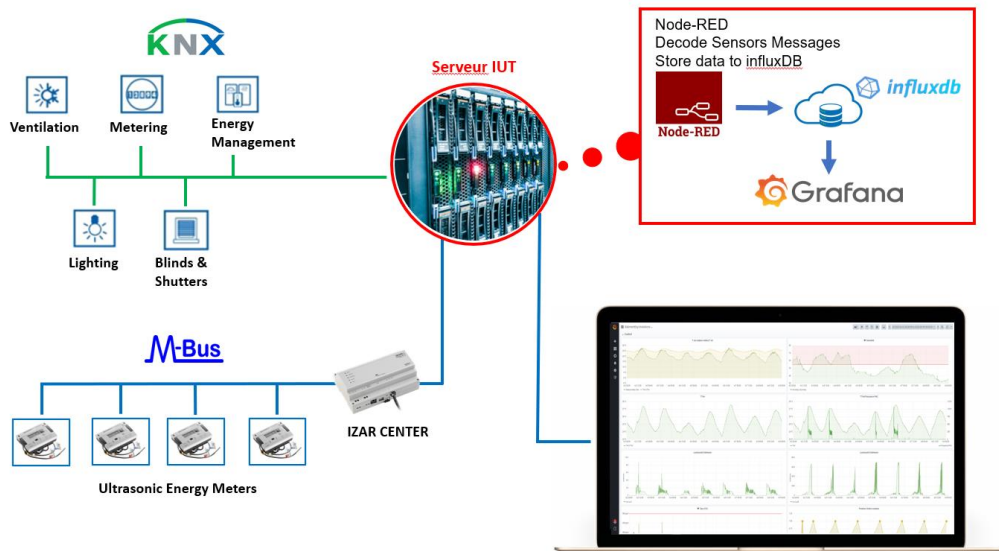


Figure 3-26. Systèmes de communication des capteurs installés

Les différents éléments du bâtiment sont connectés à des outils numériques installés sur le serveur du département de Génie Civil de l'IUT par le réseau internet de l'IUT. Les mesures de température, d'humidité, du taux CO₂ et d'énergies sont récupérées par le protocole KNX. Ensuite, elles sont décodées par l'outil NODE-RED puis stockées dans une base de données InfluxDB. Enfin, la base de données InfluxDB est reliée à Grafana, outil d'affichage et de monitoring pour tracer les graphiques en temps réel.

4.3.1. Node-Red

Node-RED est un outil de programmation basé sur les flux, développé à l'origine par l'équipe Emerging Technology Services d'IBM en 2013 pour faciliter la création des objets connectés. Node-RED est un outil de programmation permettant de câbler ensemble des dispositifs matériels, des API et des services en ligne de manière nouvelle et intéressante. C'est un langage graphique (sous-jacent en javascript) qui permet de créer des liens entre les flux de données entrants et sortants.

Il est gratuit et nécessite : NodeJS (javascript du côté serveur). C'est avant tout un outil visuel conçu pour l'Internet des objets, mais il peut également être utilisé pour d'autres applications afin d'assembler très rapidement des flux de services divers.

Node-RED est un logiciel permettant de gérer des flux de services, des suites de traitements à effectuer suite à la réception de messages ou événements. Dans Node-RED, une « fonctionnalité » est représentée sous la forme d'une node, un élément pouvant être placé dans un flow, reliée à d'autres nodes en entrée ou en sortie. Le flow est donc l'ensemble des nodes.

La figure 3-27 présente l'interface Node-Red développée pour le bâtiment expérimental de l'IUT. Les cellules sont les nodes. Chaque node a sa propre fonctionnalité. Les différents éléments KNX sont connectés via des passerelles KNX/IP à la « Node KNX » (la cellule verte) dans l'interface Node-RED

installée sur le serveur de l'IUT. Puis les flux des données transmises par la passerelle KNX sont filtrés par chaque élément selon l'IP qui est déjà adressé par le logiciel ETS 4.

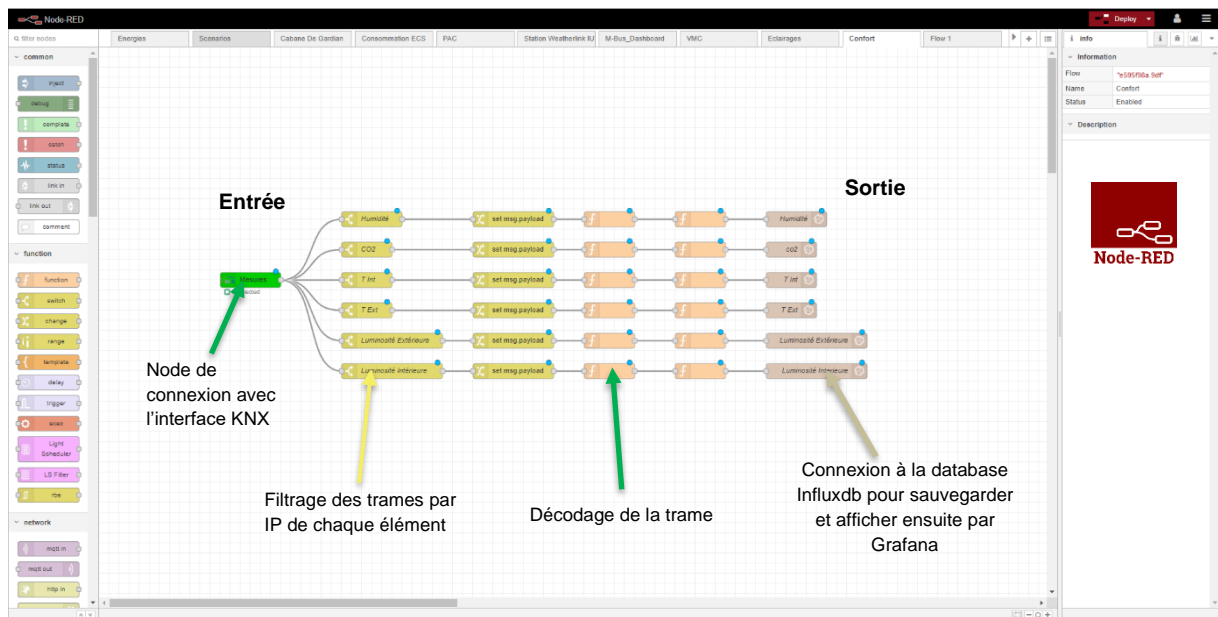


Figure 3-27. Interface Node-Red

4.3.2. InfluxDB

InfluxDB est une base de données de séries chronologiques, qui permet de compresser un large volume de données venant de multiples sources. Cet outil se fait progressivement indispensable, en raison de l'essor de l'internet des objets (véhicules connectés, appareils domestiques, machines de production...). InfluxDB vise à collecter le nombre croissant des données métriques. Il s'agit de la compilation de valeurs numériques comme le nombre de lignes de codes, les clics, le nombre de commentaires... La base de données gère aussi les événements, ces programmes d'automatisation de systèmes. InfluxDB est écrite avec le langage de programmation GO (utilisé par Google). Les informations enregistrées dans Influx DB sont présentées par la plateforme Grafana.

4.3.3. Grafana

Pour visualiser les données et fournir des mesures, la plateforme d'analyse open-source Grafana est bien appropriée. Grafana permet d'interroger et de visualiser les données dans des tableaux de bord personnalisables. L'outil permet d'étudier, d'analyser et de surveiller les données sur une période de temps, techniquement appelée analyse de séries temporelles. Grafana se connecte à toutes les bases de données possibles telles que Graphite, Prometheus, Influx DB, Elasticsearch, MySQL, PostgreSQL, etc.

Sur la plateforme Grafana du bâtiment, les mesures sont regroupées par thème :

- Bâtiment : énergie et puissance de chaque équipement, énergie totale cumulée consommée.
- Confort : températures et luminosité intérieures et extérieures, humidité, taux de CO2.
- Pompe à chaleur : énergies de chauffage et rafraîchissement, puissance électrique, débit et volume d'eau, températures d'aller et de retour d'eau et l'énergie électrique consommée.

- Chauffe-eau électro-solaire : Énergie solaire produite, puissance électrique du ballon, débit et volume d'eau, températures d'aller et de retour d'eau, énergie électrique consommée, températures du ballon et celle du capteur.
- ECS consommée : volume et débit d'eau, températures d'aller et de retour.
- P.V : Énergie produite, versée au réseau de l'IUT et autoconsommée par le bâtiment.
- VMC double Flux : énergie électrique consommée et puissance électrique.
- Eclairage : énergie électrique consommée et puissance électrique.
- Prises : énergie électrique consommée et la puissance électrique.
- Volets : position des volets, énergie électrique consommée et puissance électrique.
- Module Hydraulique : énergies de chauffage et rafraîchissement, puissance électrique, débit et volume d'eau, températures d'aller et de retour d'eau et l'énergie électrique consommée.

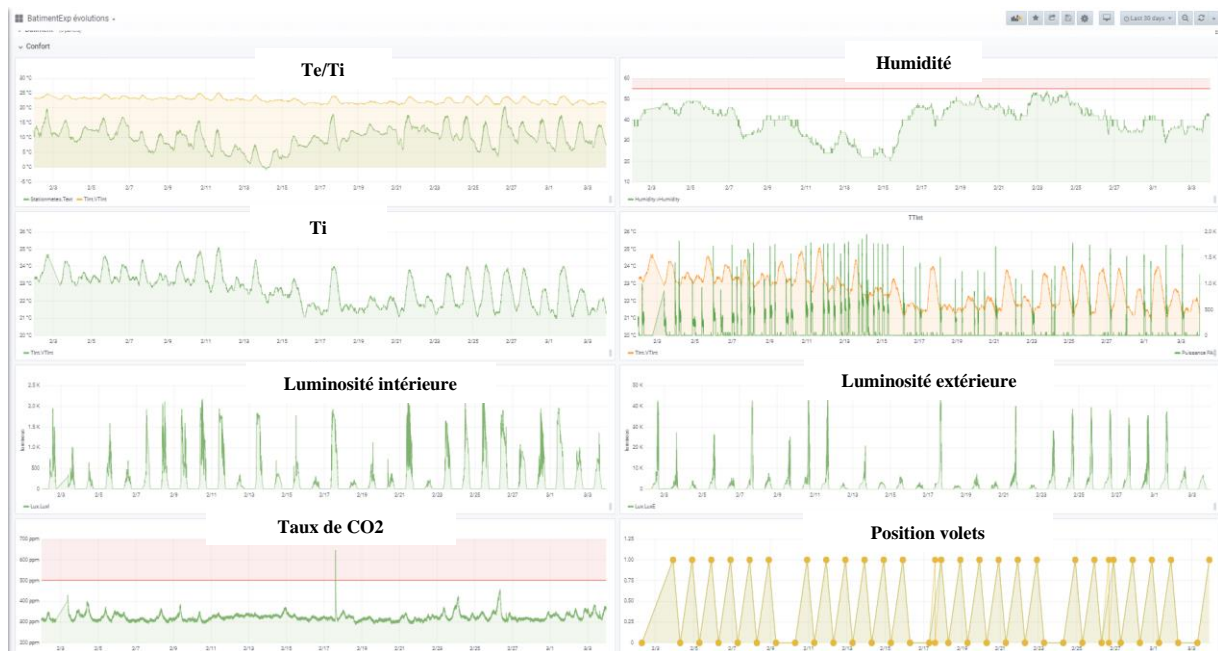


Figure 3-28. Plateforme de monitoring – Grafana

Des plugins de l'outil Grafana permettent l'affichage des données instantanées, cumulées ou déduites des mesures pour plusieurs types d'affichage (graphe, camembert, jauge, bar, etc.).

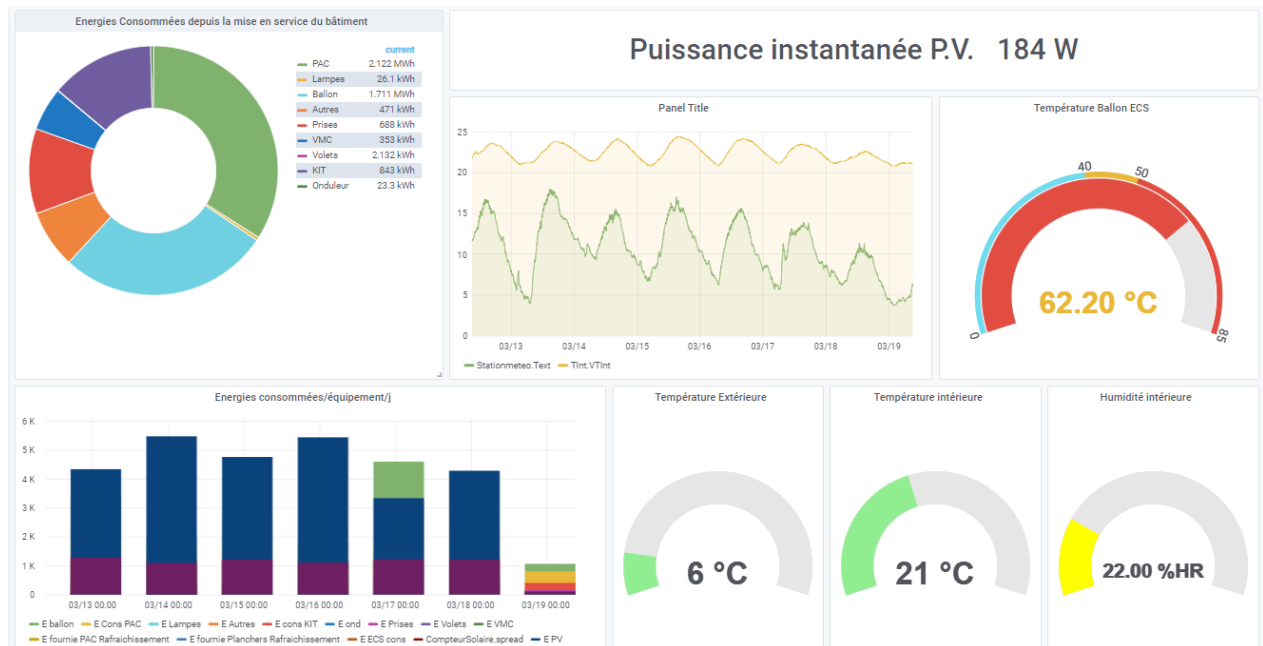


Figure 3-29. Affichages d'un tableau de bord - Grafana

Avec Grafana, nous pouvons présenter l'évolution des paramètres sur des périodes différentes (heure, jour, semaine, mois, année). Plusieurs paramètres peuvent être représentés simultanément sur un même graphe pour confrontation visuelle des variations et exportés en fichier csv pour analyse.

4.4. Données météorologiques

4.4.1. Météo France

Un abonnement Météo France permet de récupérer les données météo horaires. Deux stations dans le Gard sont connectées à Météo France, Nîmes - Courbessac et Nîmes - Garons. Les deux stations sont de type 0, stations synoptiques, acquisition du temps réel et expertise à J+1. La station Nîmes - Courbessac est à 8,8 km de l'IUT tandis que la station Nîmes -Garons se trouve à 11 km de l'IUT.

4.4.2. Station météo sur site

Une station Vantage 2 pro Davis sans fil et avec ventilation est installée sur la toiture terrasse du département Génie Civil de l'IUT. La station est connectée au réseau de l'IUT via un enregistreur « Data Logger » de données IP.

L'installation d'une station météo professionnelle sur le site de l'IUT permet d'obtenir les données climatiques précises du lieu. Parmi ces mesures, les radiations solaires sont primordiales parce qu'elles nous permettent de déduire précisément les apports solaires dus aux vitrages mais également les flux solaires reçus sur par les panneaux photovoltaïques et le panneau thermique (orientés Sud) selon leurs inclinaisons (45° et 15°).



Figure 3-30. Station météo de l'IUT

| Résolution | Plage de valeurs | | Intervalle de MAJ | Précision |
|---------------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|-----------------|
| TEMPÉRATURE INT. | 0.1 °C | 0 à 60 °C | 60 s | +/- 0.5 °C |
| TEMPÉRATURE EXT. | 0.1 °C | -40 à 65 °C | 10 à 12s | +/- 0.3 °C |
| HUMIDITÉ INT. | 1% | 1 à 100% | 60s | +/- 3% |
| HUMIDITÉ EXT. | 1% | 1 à 100% | 50 à 60s | +/- 2% |
| PRESSION ATMOSPHÉRIQUE | 0.1 hPa | 540 à 1100 hPa | 60s | +/- 1 hPa |
| INDICE DE CHALEUR | 1 °C | -40 à 74 °C | 10 à 12s | +/- 1.5 °C |
| POINT DE ROSEE | 1 °C | -76 à 54 °C | 10 à 12s | +/- 1.5 °C |
| PRECIPITATIONS | 0.2 mm | 0 à 999.8 mm | 20 à 24s | +/- 3% du total |
| INTENSITE PRECIPITATIONS | 0.1 mm | 1 à 2438 mm/h | 20 à 24s | +/- 5% |
| TEMPERATURE RESENTIE | 1 °C | -79 à 57 °C | 10 à 12s | +/- 1 °C |
| VITESSE DU VENT | 1 km/h | 3 à 290 km/h | 2.5 à 3s | +/- 3 km/h |
| DIRECTION DU VENT | 1° | 0 à 360° | 2.5 à 3s | +/- 3° |
| EVAPOTRANSPIRATION | 0.1 mm | 0 à 1 999.9 mm | 1 heure | +/- 0.25 mm |
| RAYONNEMENT SOLAIRE | 1 W/m ² | 0 à 1800 W/m ² | 50 à 60s | +/- 5% |
| INDICE UV | 0.1 | 0 à 16 | 50 à 60s | 5% |

Tableau 3-5. Caractéristiques de la station météo de l'IUT

La figure 3-31 compare les mesures de températures extérieures issues des deux stations Météo France (Courbessac et Garons), du capteur KNX et de la station de l'IUT. Les deux stations Météo France effectuent des mesures au pas horaire ; le capteur KNX, dont les mesures de températures présentent des écarts significatifs avec celles de la station météo de l'IUT et de météo France Courbessac, est écarté au profit de la station de l'IUT.

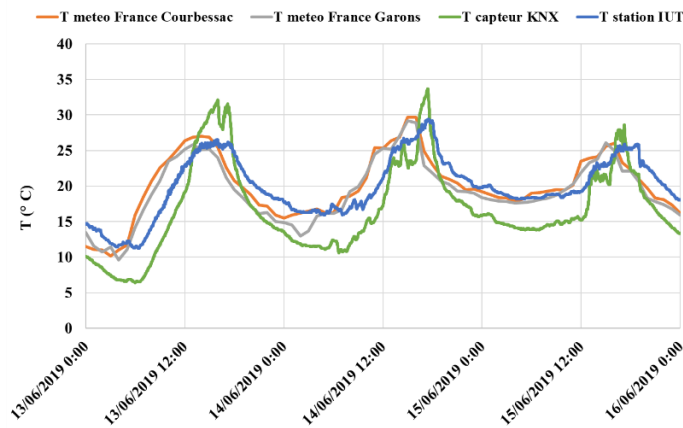


Figure 3-31. Mesures de températures issues des différentes stations météo et du capteur KNX

La station Vantage pro 2 de l'IUT (en bleu) suit en effet les mêmes variations de température que les stations de Météo France, validant ainsi les mesures effectuées, mais avec un pas de temps réduit (minute) pour une meilleure analyse de la météo locale et de son influence sur le bâtiment.

Les données de la station de l'IUT avec un pas de temps d'1 minute permettent donc une analyse fine des consommations mais ne sont pas aussi complètes que celles fournies par Météo France (température de l'eau froide, nébulosité, ...). Aussi, dans les parties suivantes, les données de la station météo de l'IUT sont utilisées dans l'analyse du comportement énergétique des systèmes et du bâtiment tandis que celles de Nîmes-Corbessac sont utilisées dans l'outil de simulation thermique dynamique car le pas horaire est suffisant et qu'elles fournissent tous les éléments nécessaires à la simulation.

5. Conclusion

Le bâtiment expérimental de l'IUT de Nîmes est constitué d'une pièce de vie et d'un local technique pour une surface de 20 m². Il est constitué d'une structure à ossature bois avec isolant métrisse. Il dispose d'un plancher chauffant et rafraîchissant couplé à une PAC air-eau réversible, d'une VMC DF reliée à un échangeur sol-air, d'un ballon d'ECS électro-solaire et de panneaux photovoltaïques de puissance crête 1500 Wc.

L'installation des équipements et l'instrumentation mis en place permettent la qualification des échanges énergétiques du bâtiment et des systèmes sur toute saison en mode chauffage et rafraîchissement et selon le comportement de l'individu programmé. Le pilotage des volets, de l'éclairage, du puisage d'ECS, de la VMC peut être effectué et programmé à distance afin de simuler un comportement de l'individu. Les mesures d'énergies, températures, puissances, qualité d'air, irradiations solaires, vitesse et direction du vent, pluviométrie sont visualisables automatiquement sous forme de graphes, bars, camembert, etc. et accessibles et exportables à distance pour traitement.

Les mesures issues de la station météo installée sur la toiture terrasse de l'IUT sont très voisines de celles fournies par Météo France – Corbessac mais avec un pas de temps plus réduit. Elles permettent ainsi une description fine de la météorologie locale pour l'analyse du bâtiment, des capteurs thermiques et photovoltaïques.

Une réflexion et un travail d'amélioration doivent être conduits au sujet de l'acquisition des données afin de pouvoir disposer de l'ensemble des données sans interruption même en cas de coupures du courant par l'installation d'un onduleur connecté aux éléments de mesures et aux passerelles KNX et M-Bus du bâtiment.

CHAPITRE 4 : SCENARIOS D'USAGE, CONFORT ET ECHANGES ENERGETIQUES DU BATIMENT

| | |
|---|-----|
| 1. Introduction | 93 |
| 2. Le scénario météorologique | 93 |
| 3. Scénarios de l'utilisateur | 96 |
| 4. Bilan annuel de confort intérieur | 98 |
| 4.1. Températures | 98 |
| 4.2. Température du confort intérieur..... | 98 |
| 4.3. Humidité relative intérieure..... | 99 |
| 4.4. Taux de CO2 | 101 |
| 5. Bilan énergétique annuel | 102 |
| 5.1. Énergies électriques..... | 102 |
| 5.2. Énergies Thermiques | 103 |
| 6. Analyse énergétique des systèmes et du bâtiment..... | 105 |
| 6.1. Panneaux solaires photovoltaïques..... | 105 |
| 6.2. Ballon ECS électro-solaire | 111 |
| 6.3. Ventilation Mécanique Contrôlée Double Flux..... | 119 |
| 6.4. Bâtiment | 123 |
| 7. Conclusion..... | 129 |

1. Introduction

Grâce aux capteurs installés (Annexe 6.3) et aux systèmes de communication et de stockage, les différents paramètres du bâtiment (tels que la température intérieure, l'humidité relative, les énergies consommées et produites, etc.) sont mesurés sur une année complète qui s'étend du 01 janvier 2020 au 31 décembre 2020 et permettent d'évaluer le bilan énergétique annuel du bâtiment.

L'originalité de cette étude porte sur la présentation du comportement énergétique d'un bâtiment expérimental connecté et des systèmes installés (pompe à chaleur réversible air-eau, panneaux photovoltaïques, ballon ECS solaire et VMC DF) sur l'année 2020 en milieu méditerranéen et pour un comportement simulé de l'utilisateur.

2. Le scénario météorologique

La ville de Nîmes se situe dans un milieu méditerranéen, sous l'influence du climat méditerranéen, en zone climatique H3 de la RT 2012. Nîmes a eu 2635 heures de soleil en 2020, tandis que le temps d'ensoleillement moyen des villes en France est de 2089 heures. Nîmes est ainsi une des villes les plus ensoleillées de France.

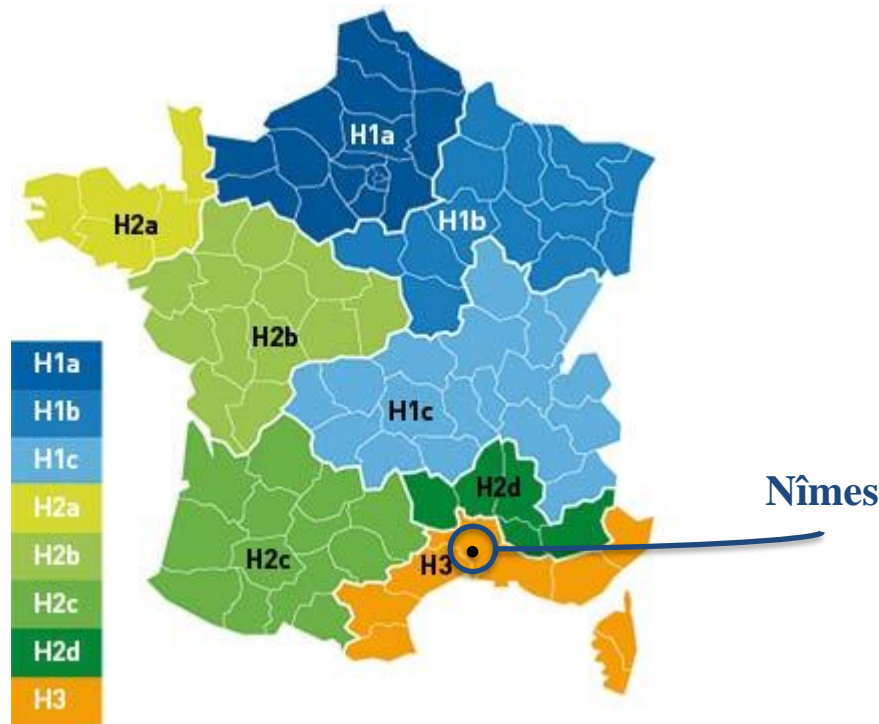


Figure 4-1. Zones climatiques RT 2012

Il est intéressant de confronter les données météorologiques du scénario conventionnel de la RT 2012 en zone H3 [68] avec les données réelles des années 2019 et 2020 mesurées par la station météo de l'IUT. En effet, les données du scénario météo de référence RT 2012 sont basées sur la climatologie moyenne de la période de janvier 1994 à décembre 2008 issues de Météo France. Cette comparaison va permettre de pouvoir évaluer l'écart du scénario météo réglementaire et avec les scénarios réels.

Le moteur de calcul qui équipe tous les logiciels de calcul réglementaire s'appuie sur des scénarios météo conventionnels de la RT 2012 selon la zone climatique parmi les 8 (H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d, H3).

Les figures 4-2, 4-3 présentent les températures journalières min et max du scénario météo conventionnel (Zone H3, altitude < 400 m) et celles de la station météo Courbessac (Météo France) pour 2019 et 2020.

Pour l'année 2020, le record de température est mesuré le 01 août à 41,5 °C. Il apparaît que les températures maximales réelles sont en général très supérieures aux températures maximales de la météo conventionnelle surtout en été, et que les températures minimales réelles sont en général inférieures à celles de la météo conventionnelle en hiver. Ceci se justifie par le lissage dû à la moyenne des météos des années 1994 à 2008 pour construire la météo conventionnelle de la réglementation pour le lieu considéré.

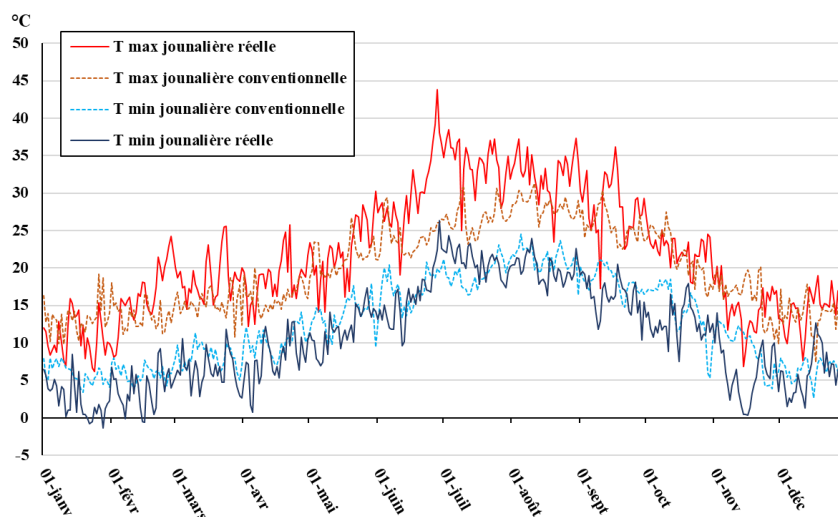


Figure 4-2. Comparaison de l'évolution de la température des scénarios météo réel 2019 et conventionnel sur Nîmes

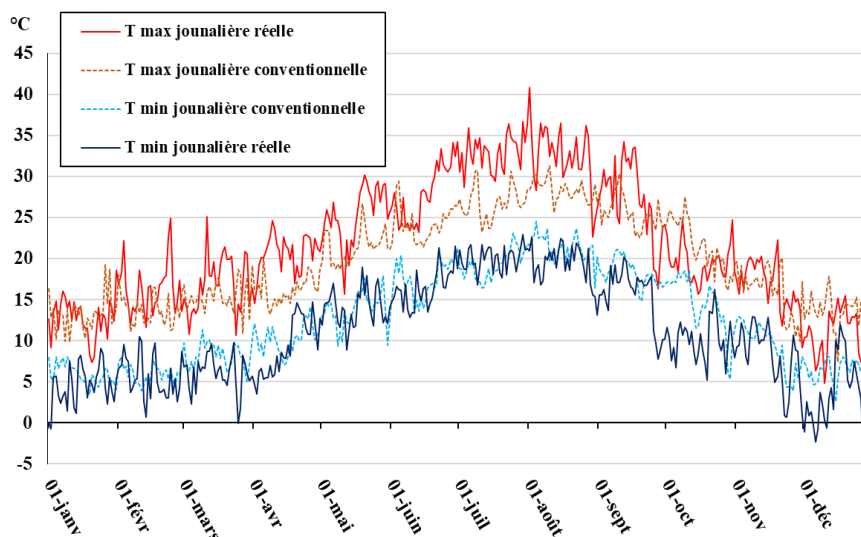


Figure 4-3. Comparaison de l'évolution de la température des scénarios météo réel 2020 et conventionnel sur Nîmes

En période estivale, les valeurs moyennes de températures et les amplitudes journalières pour la météorologie réelle de l'année 2020 apparaissent supérieures à celles de la météorologie conventionnelle. Les besoins de rafraîchissement du bâtiment en été seront sous-estimés par les scénarios RT vis-à-vis du scénario météo réel. En période de chauffage, la rigueur climatique du lieu est

classiquement qualifiée par les degrés jours base 18 °C, somme des écarts cumulés de la température extérieure à 18 °C.

Cette analyse des graphes peut être réduite à l'étude des degrés jours unifiés (DJU) mensuels base 18 °C :

| Mois | DJU mensuels conventionnels | DJU station météo Courbessac 2019 | DJU station météo Courbessac 2020 |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Janvier | 261,4 | 348,3 | 291,5 |
| Février | 230,5 | 228,3 | 199,3 |
| Mars | 194,4 | 174,4 | 201,6 |
| Avril | 143,5 | 145,7 | 99 |
| Mai | 31,1 | 74,3 | 14,5 |
| Octobre | 34,7 | 51,2 | 97,7 |
| Novembre | 158 | 226 | 158 |
| Décembre | 246,5 | 248,5 | 329,3 |
| Total | 1302 | 1511 | 1408,3 |

Tableau 4-1. DJU chauffagiste réels 2019, 2020 et issus de la météo conventionnelle [68]

| Mois | DJU mensuels conventionnels | DJU station météo Courbessac 2019 | DJU station météo Courbessac 2020 |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Mai | 33,1 | 51,3 | 93,8 |
| Juin | 97,4 | 178,7 | 145,2 |
| Juillet | 158,2 | 299,2 | 268,7 |
| Août | 212,3 | 265,7 | 254,1 |
| Septembre | 121,23 | 147,1 | 135,7 |
| Total | 622,3 | 942 | 897,5 |

Tableau 4-2. DJU climaticien réels base 18 ° C en 2019, 2020 et issus de la météo conventionnelle

Les DJU réels apparaissent ainsi très supérieurs sur les mois les plus froids (décembre, janvier) et sur le total de la période de chauffage vis-à-vis des DJU conventionnels. Les températures intérieures réelles des bâtiments peuvent ainsi être différentes à celles obtenues par les scénarios météorologiques conventionnels des outils de simulation réglementaires.

3. Scénarios de l'utilisateur

Grâce au système de pilotage, différents scénarios de l'action de l'utilisateur sur les équipements ont été programmés tout au long de l'année 2020. Ces scénarios portent sur les actions de l'occupant relatives à la consigne de la température intérieure, la gestion des volets et la consommation d'ECS en dehors de tout apport métabolique, de vapeur ou de CO₂ du fait de l'inoccupation permanente du bâtiment (même si des interventions humaines ponctuelles peuvent bien sûr avoir lieu). La gestion de l'éclairage du bâtiment et de sa ventilation ne fait pas l'objet d'étude spécifique puisque le bâtiment est conçu pour s'éclairer en cas de présence détectée et la ventilation est automatiquement pilotée par la VMC DF. (Les consommations d'éclairage relevées permettent d'identifier les périodes d'intervention humaine dans le bâtiment).

Nous avons défini 3 scénarios différents pour la gestion des volets selon la position fermé, ouvert et mi-ouvert pendant la journée. L'objectif sera d'analyser l'impact des apports solaires sur la consommation énergétique et la température intérieure du bâtiment selon le comportement Expert, Contreproductif et intermédiaire, en été et en hiver. Ces comportements types d'occupant ont été identifiés in-situ au cours des travaux de BATIER [1] portant sur treize appartements instrumentés de capteurs autonomes (température, humidité et gestion des volets).

La température intérieure de consigne est fixée à quatre niveaux en hiver : 18 °C, 20 °C, 21 °C, 23 °C tandis qu'elle est à deux niveaux en été à 24 °C et 26 °C. Cette température intérieure de consigne à définir sur la boîte de commande de la PAC ne peut s'effectuer à distance et nécessite une intervention sur site. L'objectif est ainsi d'évaluer l'impact de la consigne sur la consommation énergétique de la PAC compte tenu des apports internes et externes du bâtiment. Les 4 niveaux de températures de consigne hivernale peuvent caractériser le comportement de l'utilisateur économe et peu frileux (18 °C) jusqu'à celui d'un occupant frileux et peu regardant sur ses consommations de chauffage (23 °C).

Le 18/12/2020, une coupure générale du courant au niveau de l'IUT a engendré l'arrêt du disjoncteur différentiel général du bâtiment et donc l'arrêt de l'acquisition des mesures pendant une dizaine de jours ; de ce fait nous n'avons pu effectuer l'analyse du scénario pour la température de consigne à 23 °C.

La consommation d'ECS est programmée par la durée de l'ouverture de l'électrovanne actionnant l'ouverture du circuit d'eau chaude (mitigée à 50 °C) provenant du ballon ECS pour un rejet dans un évier de la pièce vie. Cette consommation s'effectue sur 3 puisages journaliers : 7h – 12h – 19h pour un total de 50l/j pour la période 01/01/2020 à 16/04/2020 (bleu marin) et 100l/j (bleu foncé) pour le reste de l'année en dehors des périodes d'arrêt de puisage allant de 10/08/2020 au 22/10/2020 inclus. Ces puisages correspondent environ aux consommations journalières d'une et 2 personnes respectivement (ADEME). La température maximale du ballon (ajustable par l'occupant) est fixée à 85 °C, le déclenchement de l'appoint électrique du ballon (ajustable par l'occupant) est fixé à 60 °C (réglage par défaut en sortie d'usine du constructeur, cette température a été maintenue tout au long de la campagne de mesures). L'objectif est d'évaluer l'impact du taux d'occupation sur la consommation énergétique du ballon mais aussi sur l'efficacité énergétique du système solaire.

Une période de vacances du 10/08 à 25/08/2020 (mise à l'arrêt de la PAC, des consommations ECS, fermeture des volets, mode réduit de la VMC) est fixée pour une possibilité d'analyse comportementale du bâtiment en été en période d'inoccupation (analyse non présentée dans ce document).

Le tableau suivant présente le calendrier quotidien des scénarios de l'année 2020. Chaque journée est caractérisée par la valeur de la température de consigne et la couleur traduit la position en journée des volets (jaune : ouvert, orange : mi-ouvert et gris : fermé).

Calendrier scénarios 2020

| Janvier | | Février | | Mars | | Avril | | Mai | | Juin | | Juillet | | Août | | Septembre | | Octobre | | Novembre | | Décembre | |
|---------|------|---------|------|------|------|-------|------|-----|------|------|------|---------|------|------|------|-----------|------|---------|------|----------|------|----------|------|
| 1 | 18°C | 1 | 18°C | 1 | 21°C | 1 | 21°C | 1 | 21°C | 1 | 26°C | 1 | 26°C | 1 | 26°C | 1 | 26°C | 1 | 24°C | 1 | 24°C | 1 | 20°C |
| 2 | 18°C | 2 | 18°C | 2 | 21°C | 2 | 21°C | 2 | 21°C | 2 | 26°C | 2 | 26°C | 2 | 26°C | 2 | 24°C | 2 | 24°C | 2 | 24°C | 2 | 20°C |
| 3 | 18°C | 3 | 18°C | 3 | 21°C | 3 | 21°C | 3 | 21°C | 3 | 26°C | 3 | 26°C | 3 | 26°C | 3 | 24°C | 3 | 24°C | 3 | 24°C | 3 | 20°C |
| 4 | 18°C | 4 | 18°C | 4 | 21°C | 4 | 21°C | 4 | 21°C | 4 | 26°C | 4 | 26°C | 4 | 26°C | 4 | 24°C | 4 | 24°C | 4 | 24°C | 4 | 20°C |
| 5 | 18°C | 5 | 18°C | 5 | 21°C | 5 | 21°C | 5 | 21°C | 5 | 26°C | 5 | 26°C | 5 | 26°C | 5 | 24°C | 5 | 24°C | 5 | 24°C | 5 | 20°C |
| 6 | 18°C | 6 | 18°C | 6 | 21°C | 6 | 21°C | 6 | 21°C | 6 | 26°C | 6 | 26°C | 6 | 26°C | 6 | 24°C | 6 | 24°C | 6 | 24°C | 6 | 20°C |
| 7 | 18°C | 7 | 21°C | 7 | 21°C | 7 | 21°C | 7 | 21°C | 7 | 26°C | 7 | 26°C | 7 | 26°C | 7 | 24°C | 7 | 24°C | 7 | 24°C | 7 | 20°C |
| 8 | 18°C | 8 | 21°C | 8 | 21°C | 8 | 21°C | 8 | 21°C | 8 | 26°C | 8 | 26°C | 8 | 26°C | 8 | 24°C | 8 | 24°C | 8 | 24°C | 8 | 20°C |
| 9 | 18°C | 9 | 21°C | 9 | 21°C | 9 | 21°C | 9 | 21°C | 9 | 26°C | 9 | 26°C | 9 | 26°C | 9 | 24°C | 9 | 24°C | 9 | 24°C | 9 | 20°C |
| 10 | 18°C | 10 | 21°C | 10 | 21°C | 10 | 21°C | 10 | 21°C | 10 | 26°C | 10 | 26°C | 10 | 26°C | 10 | 24°C | 10 | 24°C | 10 | 24°C | 10 | 20°C |
| 11 | 18°C | 11 | 21°C | 11 | 21°C | 11 | 21°C | 11 | 21°C | 11 | 26°C | 11 | 26°C | 11 | 26°C | 11 | 24°C | 11 | 24°C | 11 | 24°C | 11 | 20°C |
| 12 | 18°C | 12 | 21°C | 12 | 21°C | 12 | 21°C | 12 | 21°C | 12 | 26°C | 12 | 26°C | 12 | 26°C | 12 | 24°C | 12 | 24°C | 12 | 24°C | 12 | 20°C |
| 13 | 18°C | 13 | 21°C | 13 | 21°C | 13 | 21°C | 13 | 21°C | 13 | 26°C | 13 | 26°C | 13 | 26°C | 13 | 24°C | 13 | 24°C | 13 | 24°C | 13 | 20°C |
| 14 | 18°C | 14 | 21°C | 14 | 21°C | 14 | 21°C | 14 | 21°C | 14 | 26°C | 14 | 26°C | 14 | 26°C | 14 | 24°C | 14 | 24°C | 14 | 24°C | 14 | 20°C |
| 15 | 18°C | 15 | 21°C | 15 | 21°C | 15 | 21°C | 15 | 21°C | 15 | 26°C | 15 | 26°C | 15 | 26°C | 15 | 24°C | 15 | 24°C | 15 | 24°C | 15 | 20°C |
| 16 | 18°C | 16 | 21°C | 16 | 21°C | 16 | 21°C | 16 | 21°C | 16 | 26°C | 16 | 26°C | 16 | 26°C | 16 | 24°C | 16 | 24°C | 16 | 24°C | 16 | 20°C |
| 17 | 18°C | 17 | 21°C | 17 | 21°C | 17 | 21°C | 17 | 26°C | 17 | 26°C | 17 | 26°C | 17 | 26°C | 17 | 24°C | 17 | 24°C | 17 | 24°C | 17 | 20°C |
| 18 | 18°C | 18 | 21°C | 18 | 21°C | 18 | 21°C | 18 | 26°C | 18 | 26°C | 18 | 26°C | 18 | 26°C | 18 | 24°C | 18 | 24°C | 18 | 24°C | 18 | 23°C |
| 19 | 18°C | 19 | 21°C | 19 | 21°C | 19 | 21°C | 19 | 26°C | 19 | 26°C | 19 | 26°C | 19 | 26°C | 19 | 24°C | 19 | 24°C | 19 | 24°C | 19 | 23°C |
| 20 | 18°C | 20 | 21°C | 20 | 21°C | 20 | 21°C | 20 | 26°C | 20 | 26°C | 20 | 26°C | 20 | 26°C | 20 | 24°C | 20 | 24°C | 20 | 20°C | 20 | 23°C |
| 21 | 18°C | 21 | 21°C | 21 | 21°C | 21 | 21°C | 21 | 26°C | 21 | 26°C | 21 | 26°C | 21 | 26°C | 21 | 24°C | 21 | 24°C | 21 | 20°C | 21 | 23°C |
| 22 | 18°C | 22 | 21°C | 22 | 21°C | 22 | 21°C | 22 | 26°C | 22 | 26°C | 22 | 26°C | 22 | 26°C | 22 | 24°C | 22 | 24°C | 22 | 20°C | 22 | 23°C |
| 23 | 18°C | 23 | 21°C | 23 | 21°C | 23 | 21°C | 23 | 26°C | 23 | 26°C | 23 | 26°C | 23 | 26°C | 23 | 24°C | 23 | 24°C | 23 | 20°C | 23 | 23°C |
| 24 | 18°C | 24 | 21°C | 24 | 21°C | 24 | 21°C | 24 | 26°C | 24 | 26°C | 24 | 26°C | 24 | 26°C | 24 | 24°C | 24 | 24°C | 24 | 20°C | 24 | 23°C |
| 25 | 18°C | 25 | 21°C | 25 | 21°C | 25 | 21°C | 25 | 26°C | 25 | 26°C | 25 | 26°C | 25 | 26°C | 25 | 24°C | 25 | 24°C | 25 | 20°C | 25 | 23°C |
| 26 | 18°C | 26 | 21°C | 26 | 21°C | 26 | 21°C | 26 | 26°C | 26 | 26°C | 26 | 26°C | 26 | 26°C | 26 | 24°C | 26 | 24°C | 26 | 20°C | 26 | 23°C |
| 27 | 18°C | 27 | 21°C | 27 | 21°C | 27 | 21°C | 27 | 26°C | 27 | 26°C | 27 | 26°C | 27 | 26°C | 27 | 24°C | 27 | 24°C | 27 | 20°C | 27 | 23°C |
| 28 | 18°C | 28 | 21°C | 28 | 21°C | 28 | 21°C | 28 | 26°C | 28 | 26°C | 28 | 26°C | 28 | 26°C | 28 | 24°C | 28 | 24°C | 28 | 20°C | 28 | 23°C |
| 29 | 18°C | 29 | 21°C | 29 | 21°C | 29 | 21°C | 29 | 26°C | 29 | 26°C | 29 | 26°C | 29 | 26°C | 29 | 24°C | 29 | 24°C | 29 | 20°C | 29 | 23°C |
| 30 | 18°C | | | 30 | 21°C | 30 | 21°C | 30 | 26°C | 30 | 26°C | 30 | 26°C | 30 | 26°C | 30 | 24°C | 30 | 24°C | 30 | 20°C | 30 | 23°C |
| 31 | 18°C | | | 31 | 21°C | | | 31 | 26°C | | | 31 | 26°C | 31 | 26°C | | 24°C | 31 | 24°C | | | 31 | 23°C |

Figure 4-4. Calendrier des scénarios 2020

4. Bilan annuel de confort intérieur

4.1. Températures

La température, l'humidité et le taux du CO₂ de l'air intérieur du bâtiment sont mesurés par le biais du capteur de température, d'humidité et du CO₂ installé dans la salle de vie. La figure 4-5 présente la variation de la température intérieure durant la période allant du 01 janvier 2020 au 31 décembre 2020. Le mois le plus froid de l'année est décembre avec la température extérieure la plus basse est de - 2 °C mesurée le 06 décembre 2020.

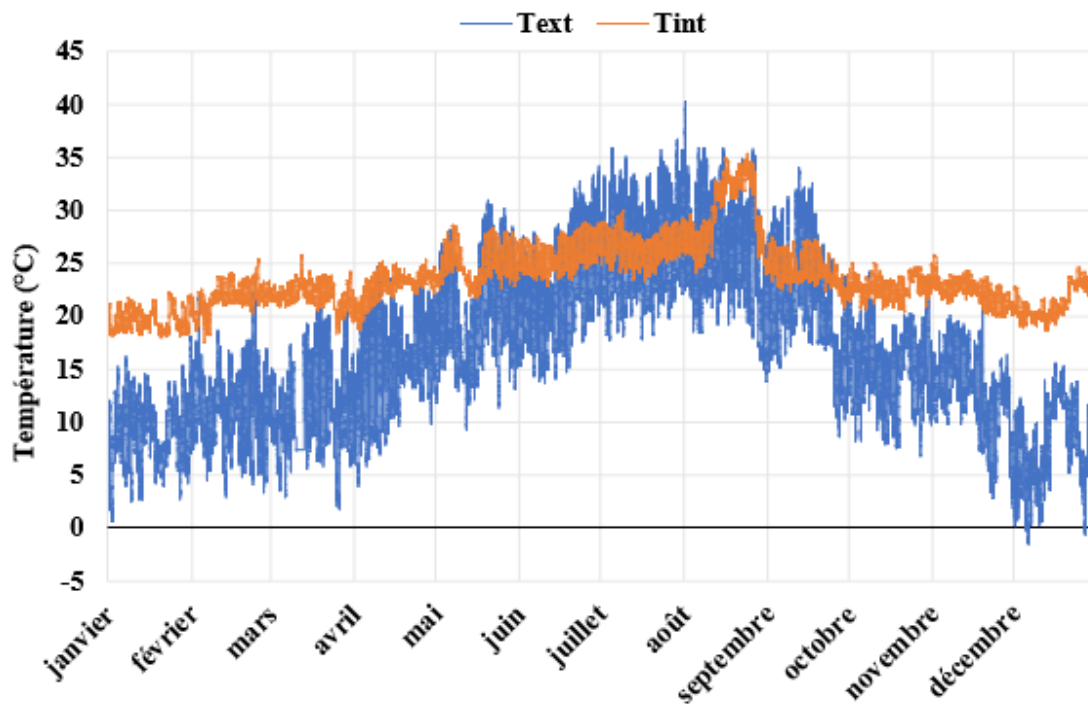


Figure 4-5. Evolution de la température extérieure et intérieure en 2020

La température extérieure la plus élevée est de 40,3 °C mesurée le premier août. La température extérieure moyenne annuelle est de 16,6 °C.

Bien que la température extérieure fluctue, la température intérieure varie dans les périodes selon la température de consigne intérieure fixée. Elle atteint une valeur maximale de 34,5 °C le 22 août 2020 (vacances) et une valeur minimale de 17,5 °C le 05 février 2020. La température moyenne intérieure annuelle est de 24 °C, avec peu de variabilité d'un mois à l'autre, à l'exception du mois d'août du fait de la canicule et des consignes de fonctionnement du bâtiment.

4.2. Température du confort intérieur

La température de confort, telle que définie, est essentiellement due à l'évolution de la température extérieure des 7 jours précédents. La figure 4-6 compare les températures intérieures réelles à celles du confort et des limites au chaud et au froid ; cela laisse apparaître une période importante d'inconfort au chaud due à la période des vacances en août (15 jours).

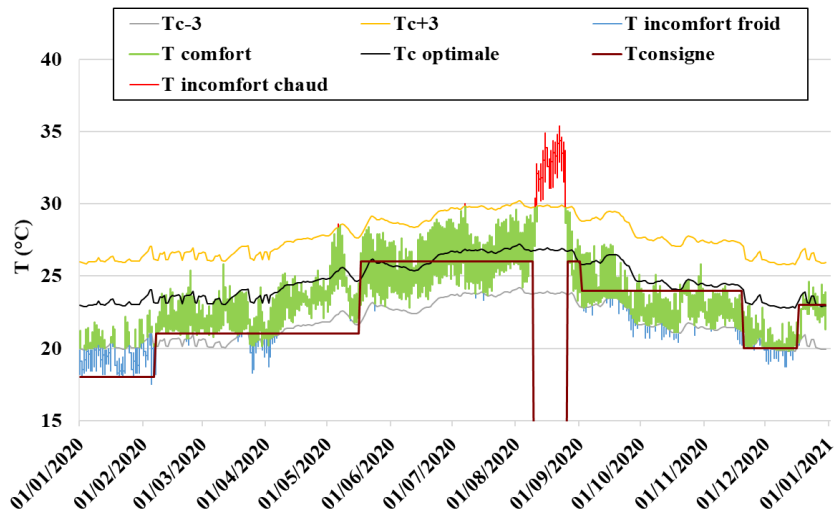


Figure 4-6. Evolution de la température de confort intérieure du bâtiment en 2020

Le cumul d'inconfort froid sur toute l'année s'évalue à 48 jours. Ce cumul peut paraître important mais s'explique par les choix de la température de consigne à 18 °C en janvier-février pour une température de confort autour de 23 °C.

La durée importante d'inconfort au froid du mois de janvier est bien sûr due à la température de consigne de 18 °C choisie.

4.3. Humidité relative intérieure

La figure 4-7 présente la variation de l'humidité relative intérieure du bâtiment et celle de l'humidité extérieure relevée par la station de l'IUT. Des sauts de l'humidité relative de l'air intérieur apparaissent dues aux variations de l'humidité relative extérieure et de la température intérieure du fait de la température intérieure de consigne et des mises en route de la pompe à chaleur en hiver et de la production de vapeur par la présence humaine occasionnelle. En été, les humidités relatives intérieure et extérieure atteignent des niveaux supérieurs majoritairement dus au rafraîchissement nocturne.

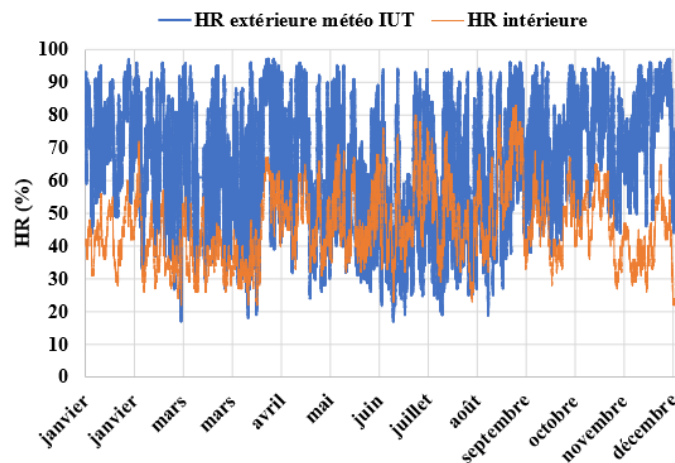


Figure 4-7. Evolution de l'humidité de l'air intérieur et de l'air extérieur (station IUT) en 2020

A partir de ces mesures, nous présentons quelques évolutions journalières des airs intérieur et extérieur sur le diagramme psychrométrique. Les figures 4-8 et 4-9 présentent celles de la journée du 11 janvier (pas d'intervention humaine et puisage d'ECS) et du 02 février de 2020 (intervention humaine dans le bâtiment et absence de puisage).

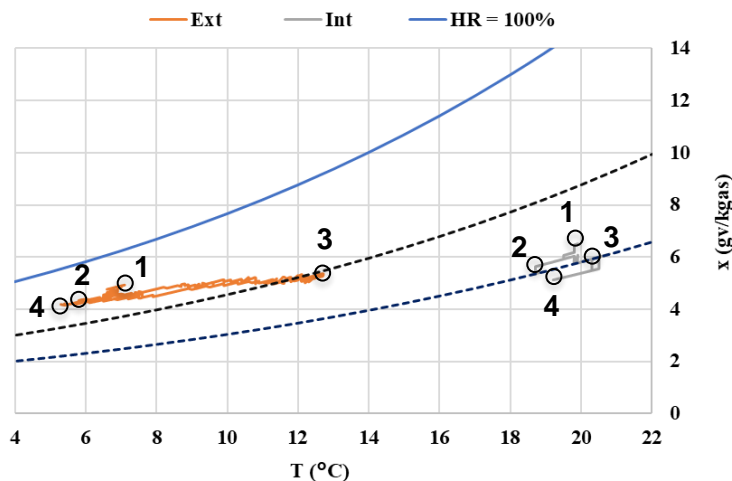


Figure 4-8. Diagramme de l'air humide 11 janvier 2020

Nous observons que les humidités absolues des airs extérieur et intérieur sont sensiblement constantes toute la journée du 11 janvier. La température extérieure décroît de 7 °C à 00h00 (point 1) à 5,8 °C à 8h20 (point 2) pour ensuite augmenter jusqu'à 12,7 °C à 14h45 (point 3) et finalement décroître jusqu'à 5,3 °C à minuit (point 4). L'air intérieur subit les mêmes évolutions mais avec des amplitudes réduites du fait des apports thermiques internes du bâtiment. Le puisage d'ECS pour un rejet dans l'évier du bâtiment vers l'égout ne génère aucun apport d'humidité notable.

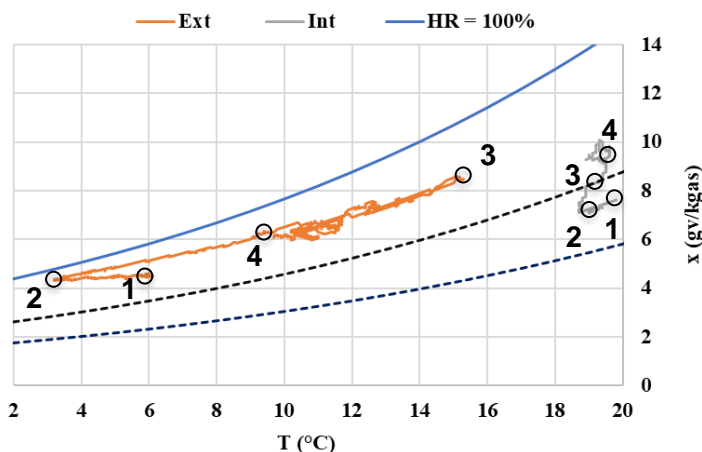


Figure 4-9. Diagramme de l'air humide 02 février 2020

Pour la journée du 02 février 2020, la température extérieure chute de 5,9 °C à 3,2 °C entre 00h00 (point 1) et 04h30 (point 2). Elle croît ensuite jusqu'à 15,3 °C à 12h55 (point 3) pour rechuter jusqu'à 9,7 °C à minuit (point 4). La température intérieure subit des évolutions en phase avec celles de l'air extérieur mais on observe entre les points 3 et 4 une forte augmentation de l'humidité absolue (et donc de l'humidité relative) du fait d'une intervention humaine au sein du bâtiment (constatée par une consommation du poste éclairage).

Une analyse des évolutions des caractéristiques d'air intérieur et extérieur est effectuée sur une journée d'été le 02/08/2020 avec puisage d'ECS et sans intervention humaine dans le bâtiment.

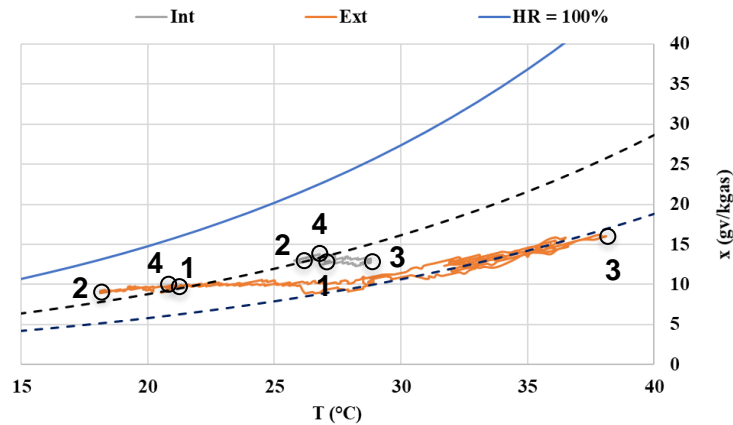


Figure 4-10. Diagramme de l'air humide 02 août 2020

La figure 4-10 montre la large amplitude des variations de la température extérieure sur la journée du 02 août 2020. La température intérieure subit des évolutions similaires avec des amplitudes réduites.

4.4. Taux de CO2

Le taux de CO2 est un indicateur de la qualité d'air corrélé à la concentration de particules virales qui permet d'estimer des seuils de sécurité vis-à-vis du risque de contamination lié à la pandémie de SARS-CoV-2. La communauté scientifique [69] considère qu'il faudrait maintenir le taux de CO2 entre 600 et 800 ppm.

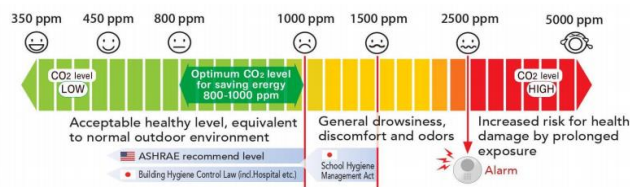


Figure 4-11. Niveaux de CO2 et risques sanitaires

La figure 4-12 présente la variation du taux de CO2 à l'intérieur du bâtiment pour l'année 2020.

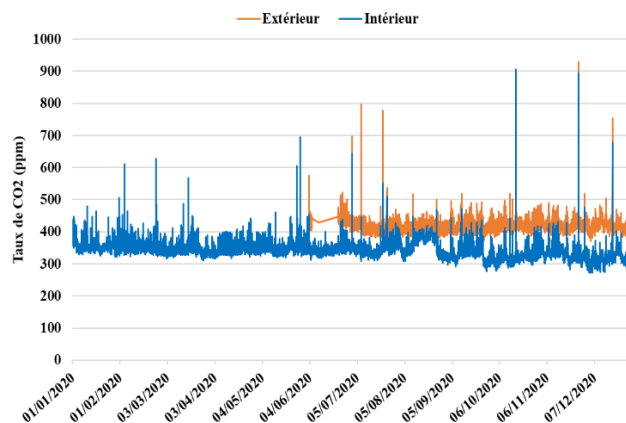


Figure 4-12. Evolution du taux de CO2 de l'air intérieur en 2020

Les pics de taux de CO₂ intérieurs affichés sur le graphe peuvent être expliqués par une pollution extérieure identifiée à l'aide d'un capteur de CO₂ installé en avril 2020 à l'extérieur sur le bâtiment administratif de l'IUT de Nîmes. On constate des niveaux de CO₂ intérieurs plus faibles que ceux mesurés à l'extérieur probablement expliqué par inoccupation humaine du bâtiment et une distance plus forte aux sources de pollution (activité industrielle et routière).

5. Bilan énergétique annuel

5.1. Énergies électriques

5.1.1. Énergies consommées

Les énergies électriques consommées sur l'année 2020 par les différents éléments du bâtiment sont présentées dans la figure 4-13 pour un total de 2328 kWh. Le ballon d'ECS est l'élément le plus consommateur du bâtiment (32% de la consommation finale suivie par la PAC qui occupe 28%) puis le module hydraulique de 19%. La partie "Autres" concerne l'instrumentation de tous les équipements et constitue une part non négligeable de la consommation globale. Les prises alimentent essentiellement l'ordinateur qui se trouve en fonctionnement permanent pour l'acquisition et l'affichage des données en temps réel (écran d'ordinateur allumé en permanence). La VMC double flux constitue également un poste important de consommation du fait des deux ventilateurs qui la composent et de son fonctionnement permanent. Elle est définie par 3 puissances possibles : mini 14W, maxi 28W et réduit 12W avec les débits d'air totaux de 60 m³/h, 120 m³/h et 30 m³/h respectivement.

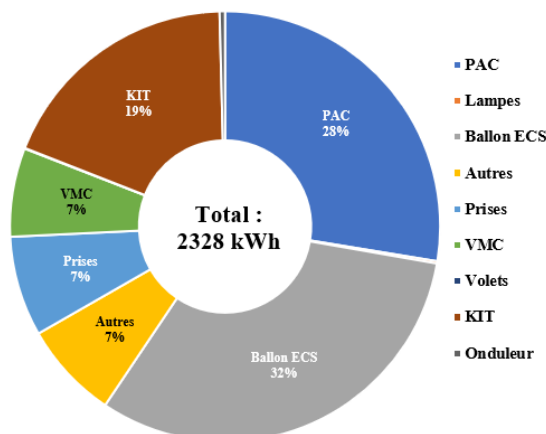


Figure 4-13. Consommations électriques des équipements en kWh en 2020

5.1.2. Énergies produites

L'énergie consommée par le bâtiment provient de deux sources : le réseau électrique de l'IUT et les panneaux photovoltaïques installés. Les panneaux ont produit 1532 kWh dont 615 kWh ont été auto-consommés par le bâtiment et 917 kWh rejetés sur le réseau de l'IUT. Celui-ci a fourni 1713 kWh au bâtiment. Donc globalement les besoins électriques sont couverts à 27% par une autoconsommation directe des panneaux photovoltaïques, 39% sont issus de l'échange entre les PV et le réseau et 34% sont entièrement apportés par le réseau.

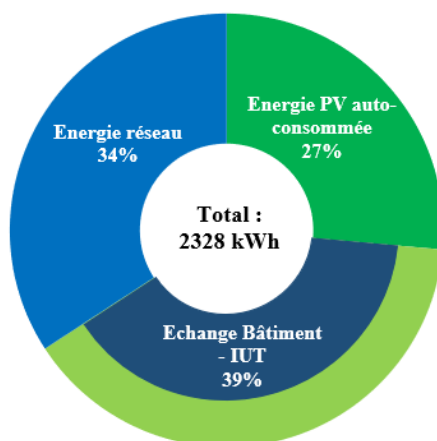


Figure 4-14. Répartition de l'énergie électrique consommée par le bâtiment pour l'année 2020

La consommation énergétique annuelle du bâtiment peut ainsi être évaluée en énergie primaire en déduisant la production des panneaux solaires photovoltaïques et en tenant compte du facteur 2,58 de conversion d'énergie électrique en énergie primaire. La surface SHON RT du bâtiment est de 20 m². Un coefficient de consommation annuelle C_{ep} en énergie primaire ramené à la surface RT est ainsi évalué : $C_{ep} = 116 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Ce coefficient caractérise le bâtiment avec ses scénarios météorologique et d'occupant qui sont différents des scénarios conventionnels de la RT 2012. Ce C_{ep} n'est donc pas à confronter au $C_{ep_{max}}$ de la RT 2012.

Dans le bâtiment, des systèmes de production et de consommation des énergies thermiques (capteur d'ECS, PAC, ECS consommée) sont mis en place. La partie suivante décrit les bilans annuels des énergies thermiques produites et consommées.

5.2. Énergies thermiques

5.2.1. Production d'ECS

Sur l'année 2020, le ballon reçoit une énergie issue du capteur solaire (941 kWh) et de la résistance électrique (737 kWh). Le compteur d'énergie à la sortie du ballon donne une consommation d'ECS de 750 kWh. L'énergie annuelle dissipée par le ballon est donc de 928 kWh.

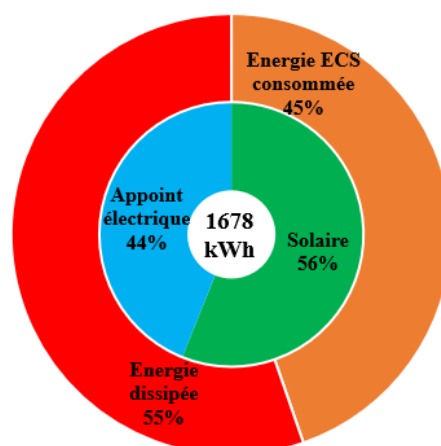


Figure 4-15. Bilan énergétique du système d'ECS du bâtiment pour l'année 2020

La part relative importante (55%) de dissipation d'énergie s'explique par les scénarios de consommation d'ECS établis : les volumes journaliers d'ECS consommée ont été fixés à 50l/j et 100l/j selon les scénarios programmés. Cette énergie dissipée propre à la conception du ballon peut prendre une part plus faible si la consommation d'ECS devient plus forte et inversement.

L'énergie dissipée est fonction de la température intérieure (dépendant de la consigne fixée) et de la température du ballon. Cette dernière dépend des apports solaires qui peuvent être limités par la température maximale du ballon (85 °C) mais également des consignes marche/arrêt (60 °C/65 °C) de l'appoint électrique fixées par l'installateur ou l'occupant.

La réduction de l'énergie dissipée du ballon ne peut s'envisager que par la surisolation de l'enveloppe thermique du ballon.

Le bilan annuel montre un ratio d'énergie d'ECS consommée à l'énergie électrique fournie de 1,02, qui caractérise du point de vue de l'utilisateur le rendement global annuel de l'installation ECS solaire. Si toute l'énergie avait été fournie au ballon d'une manière électrique, ce ratio aurait été de 0,45.

Dans la partie suivante, nous nous intéressons à évaluer le bilan énergétique annuel de la pompe à chaleur en mode chauffage et rafraîchissement.

5.2.2. Chauffage et rafraîchissement du bâtiment

La pompe à chaleur est le deuxième élément consommateur du bâtiment. Sur l'année 2020, elle consomme en mode chauffage 189 kWh d'énergie électrique en fournissant 516 kWh d'énergie au bâtiment tandis qu'elle consomme 454 kWh en mode rafraîchissement (17/05/2020 - 19/11/2020) pour évacuer 1066 kWh. Le COP saisonnier hivernal de la PAC est alors de 2,7 et celui estival (appelé aussi EER) est de 2,3.

En octobre et novembre 2020, la PAC a été maintenue en mode rafraîchissement du fait de la douceur climatique.

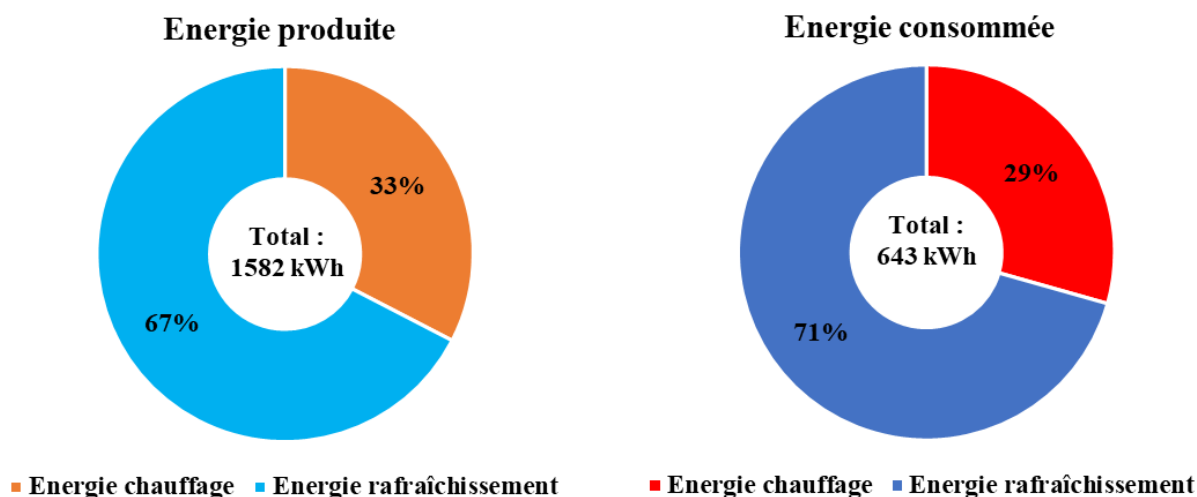


Figure 4-16. Énergies consommées et fournies par la PAC en 2020

Les consommations électriques quotidiennes de la PAC sont présentées dans la figure 4-17 en mode chauffage et rafraîchissement.

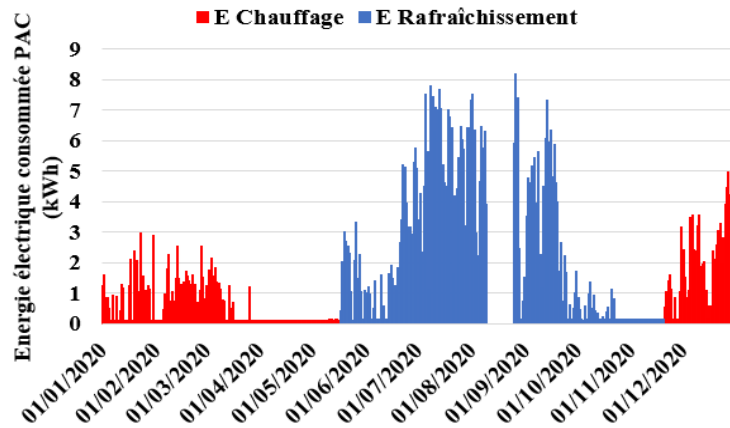


Figure 4-17. Consommation électrique journalière de la PAC en 2020

Les consommations énergétiques journalières de la PAC apparaissent donc plus importantes en mode rafraîchissement qu'en mode chauffage. Avec la configuration de notre bâtiment, le fonctionnement de la PAC est quasi nul en mi-saison (printemps et automne). Le fonctionnement en rafraîchissement constitue 68% la consommation annuelle.

L'instrumentation permet d'évaluer une analyse fine des comportements en évaluant les rendements et les efficacités de chacun des systèmes pour les comparer avec ceux affichés par les constructeurs. Nous développerons dans la partie suivante, les études détaillées qui ont été réalisées afin d'évaluer ces paramètres énergétiques.

6. Analyse énergétique des systèmes et du bâtiment

L'instrumentation des systèmes équipant le bâtiment (panneaux photovoltaïques, ballon ECS, VMC DF) et l'acquisition des mesures sur l'année 2020 permettent d'effectuer une analyse énergétique de chacun de ces systèmes et du bâtiment lui-même.

6.1. Panneaux solaires photovoltaïques

La figure 4-18 présente l'évolution journalière de l'énergie produite par les six panneaux PV et de l'irradiation solaire reçue sur le plan horizontal, mesurée par la station météo de l'IUT.

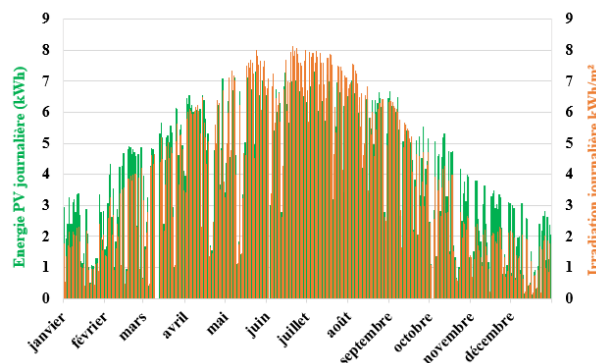


Figure 4-18. Énergie produite par les PV et irradiation journalière en 2020

Ces évolutions présentent un maximum en période estivale du fait de l'augmentation des durées journalières d'ensoleillement. On constate une concordance entre les apports et la production. En rapportant l'énergie fournie par les panneaux au produit de l'irradiation solaire sur le plan horizontal par la surface de ces panneaux, on définit un facteur d'efficacité brute (figure 4-19) de l'installation qui inclut le rendement propre des panneaux solaires et de l'onduleur mais également l'impact de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux.

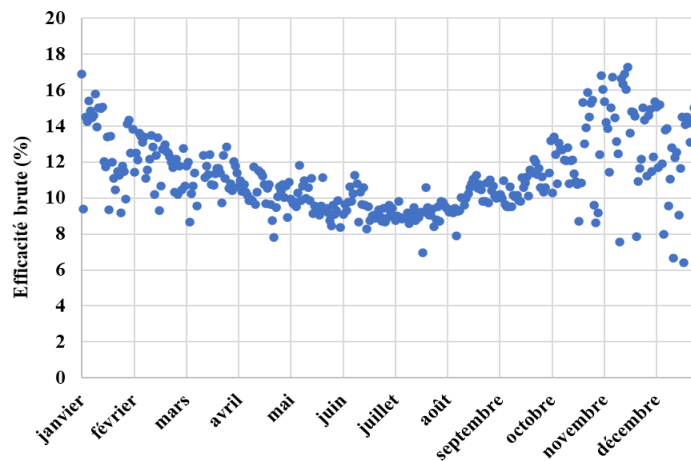


Figure 4-19. Efficacité réelle des panneaux PV 2020

On observe que cette efficacité apparente des capteurs en journées d'hiver ensoleillées est meilleure qu'en journées d'été même ensoleillées. Ceci se justifie par les longues durées d'ensoleillement d'été mais pour des durées réduites d'exposition des capteurs aux irradiations du fait de la course du soleil et des masques environnants tandis qu'en hiver, le rapport des durées d'exposition des capteurs aux durées d'ensoleillement est proche de 1.

Les panneaux solaires quelle que soit leur inclinaison sont soumis au rayonnement diffus. Le rayonnement direct qu'ils reçoivent se déduit du rayonnement direct reçu sur un plan horizontal observé par la station météo par une correction qui dépend de leur orientation, de leur inclinaison et de la position du soleil (hauteur angulaire et azimut) à tout instant.

DUFFIE et BECKMAN [70] ont présenté le rayonnement reçu (direct + diffus) sur un plan incliné à partir du rayonnement global sur un plan horizontal mesuré par une station météo.

Les relations géométriques entre un plan d'orientation particulière par rapport à la terre à un moment donné (que ce plan soit fixe ou en mouvement par rapport à la terre) et le rayon solaire entrant, c'est-à-dire la position du soleil par rapport à ce plan, peuvent être décrites en termes de plusieurs angles (Benford et Stock, 1939). Certains de ces angles sont indiqués dans la figure 4-20. Les angles et un ensemble de conventions de signes cohérentes sont les suivants :

ϕ : latitude, l'emplacement angulaire au nord ou au sud de l'équateur, nord positif ; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

δ : déclinaison, la position angulaire du soleil à midi solaire (c'est-à-dire lorsque le soleil est sur le méridien local) par rapport au plan de l'équateur, nord positif ; $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

β : inclinaison du capteur ; $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$.

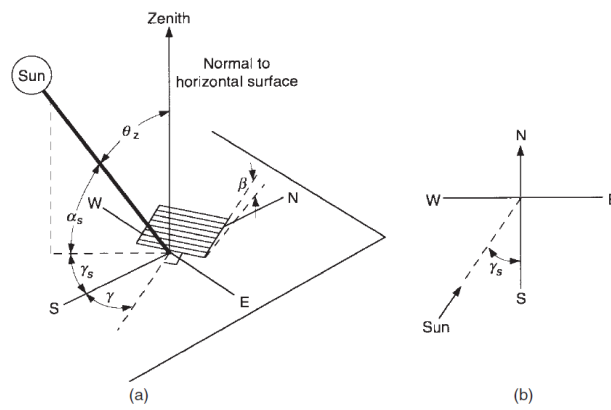


Figure 4-20. (a) Angle zénithal, pente, angle azimutal de la surface et angle azimutal du soleil pour une surface inclinée. (b) Vue en plan montrant l'angle d'azimut solaire.

DUFFIE et BECKMAN [70] définissent le rapport du rayonnement journalier direct moyen du mois sur un plan incliné orienté sud au rayonnement journalier direct moyen du mois sur un plan horizontal par l'expression :

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi-\beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180)\omega'_s \sin(\phi-\beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad [\text{Éq. 4-1}]$$

Avec :

ω_s est l'angle horaire au lever du soleil défini par :

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad [\text{Éq. 4-2}]$$

ω'_s est l'angle horaire au lever du soleil pour le plan incliné calculé (au 15 du mois) par :

$$\omega'_s = \min \left[\cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta), \cos^{-1} (-\tan (\phi - \beta) \tan \delta) \right] \quad [\text{Éq. 4-3}]$$

Pour une inclinaison de 15° et de 45° des panneaux solaires installés, l'évolution mensuelle du rapport \bar{R}_b est présentée sur le graphe ci-dessous :

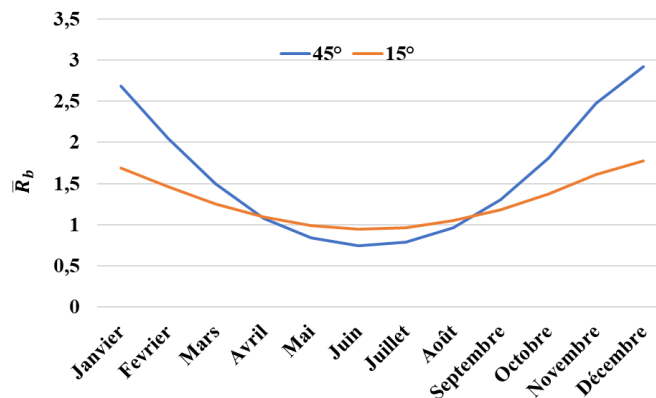


Figure 4-21. Évolution mensuelle du rapport \bar{R}_b selon l'inclinaison des panneaux solaires

H_0 est le rayonnement hors atmosphère journalier sur une surface horizontale pour un lieu et un jour n (compté à partir du 1^{er} janvier). Si G_{sc} est exprimé en watts par mètre carré, H_0 , exprimé en joules par mètre carré et par jour, est égal à :

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad [\text{Éq. 4-4}]$$

G_{sc} est la constante solaire égale à 1367 W/m².

L'indice de clarté moyen mensuel K_T est le rapport entre le rayonnement quotidien moyen mensuel sur une surface horizontale et le rayonnement hors atmosphère quotidien moyen mensuel \bar{H}_0 :

$$K_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad [\text{Éq. 4-5}]$$

La fraction mensuelle diffuse $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ est évaluée en fonction de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté K_T :

Pour $\omega_s \leq 81.4^\circ$ et $0,3 \leq K_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.560 \bar{K}_T + 4.189 \bar{K}_T^2 - 2.137 \bar{K}_T^3 \quad [\text{Éq. 4-6}]$$

Pour $\omega_s > 81.4^\circ$ et $0,3 \leq K_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022 \bar{K}_T + 3.427 \bar{K}_T^2 - 1.821 \bar{K}_T^3 \quad [\text{Éq. 4-7}]$$

\bar{H}_T est le rayonnement quotidien moyen mensuel (faisceau + diffus) sur un plan incliné :

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad [\text{Éq. 4-8}]$$

On suppose l'albédo du sol environnant $\rho_g = 0,08$ (bitume). Les résultats pour les 12 mois sont présentés dans le tableau ci-après. Les effets de l'inclinaison du plan récepteur 45° vers le sud sur le rayonnement moyen (et donc sur le rayonnement total pendant la saison hivernale) sont en effet importants.

| Mois | \bar{H} (kWh/m ²) | \bar{H}_0 (kWh/m ²) | K_T | $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ | $\bar{R}_b 15^\circ$ | $\bar{R}_b 45^\circ$ | $\bar{H}_T 15^\circ$ (kWh/m ²) | $\bar{H}_T 45^\circ$ (kWh/m ²) | η (%) |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-------|-----------------------------|----------------------|----------------------|---|---|---------------|
| Janvier | 1,49 | 3,5 | 0,42 | 0,47 | 1,69 | 2,68 | 2,02 | 2,72 | 9,1 |
| Février | 2,71 | 5,0 | 0,55 | 0,35 | 1,46 | 2,05 | 3,50 | 4,45 | 8,8 |
| Mars | 3,51 | 7,0 | 0,50 | 0,43 | 1,25 | 1,50 | 4,00 | 4,32 | 9,7 |
| Avril | 4,91 | 9,3 | 0,53 | 0,40 | 1,10 | 1,08 | 5,16 | 4,91 | 10,0 |
| Mai | 5,9 | 10,9 | 0,54 | 0,39 | 0,99 | 0,85 | 5,86 | 5,09 | 10,2 |
| Juin | 6,55 | 11,6 | 0,56 | 0,37 | 0,95 | 0,75 | 6,29 | 5,23 | 10,4 |
| Juillet | 7,13 | 11,3 | 0,63 | 0,31 | 0,96 | 0,79 | 6,93 | 5,83 | 9,9 |
| Août | 5,92 | 10,0 | 0,59 | 0,34 | 1,05 | 0,96 | 6,07 | 5,55 | 10,0 |
| Septembre | 4,65 | 7,9 | 0,59 | 0,35 | 1,18 | 1,31 | 5,19 | 5,39 | 9,3 |
| Octobre | 2,437 | 5,7 | 0,43 | 0,47 | 1,37 | 1,81 | 2,90 | 3,36 | 10,1 |
| Novembre | 1,624 | 3,9 | 0,42 | 0,48 | 1,61 | 2,47 | 2,13 | 2,78 | 10,0 |
| Décembre | 1,178 | 3,1 | 0,38 | 0,53 | 1,78 | 2,92 | 1,60 | 2,16 | 9,0 |

Tableau 4-3. Calcul de l'irradiation sur un plan incliné à 15° et 45°

L'installation est composée de six panneaux orientés sud, quatre inclinés à 15° et deux panneaux à 45°. La figure 4-22 montre l'évolution mensuelle de l'irradiation moyenne quotidienne calculée sur les deux plans inclinés.

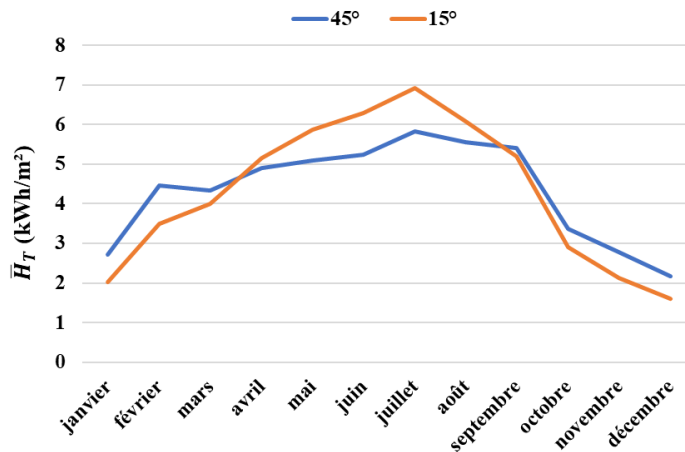


Figure 4-22. Évolution de l'irradiation moyenne quotidienne sur les deux plans inclinés à 15° et 45°

On observe que les irradiances en hiver sont plus importantes sur le plan incliné à 45° tandis qu'elles sont plus favorables en été pour les quatre panneaux à 15°.

Le rapport de l'énergie électrique journalière produite sur un mois donné (mesurée en kWh/j) aux irradiances reçues dans le plan des capteurs (calculées par le produit de \bar{H}_T par les surfaces des capteurs) définit le rendement mensuel η de l'installation photovoltaïque. Ce rendement, calculé, a une valeur variant entre 9% de 10,4% selon les mois, pour une moyenne annuelle de 9,8% en 2020 (tableau 4-3). Le rendement des panneaux solaires PV est défini par une valeur constructeur de 15,3% et l'onduleur est défini par son rendement annoncé de 90%. L'installation photovoltaïque fait l'objet de pertes par les

conducteurs électriques et les panneaux solaires subissent des pertes de rendement en fonction de leur température et de l'empoussièrément du verre frontal.

Le constructeur annonce des coefficients de réduction des caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque par l'augmentation de sa température. Le facteur concernant la puissance est annoncé à $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$ - Annexe 3.3. Dans ce cadre, des recherches ont été menées par HALLAL et al. [71] pour augmenter le rendement net du panneau photovoltaïque équipé d'un système de refroidissement. Leurs travaux ont consisté à trouver une température maximale optimale admissible pour la mise en fonctionnement d'un système de refroidissement couplé aux panneaux photovoltaïques pour réduire leur température. Ils ont trouvé que lorsque la température de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque augmente, son efficacité diminue de manière significative. Les mesures expérimentales de l'énergie nette de récoltées (validées par le calcul analytique) montrent que 45°C est la valeur optimale de la température maximale admissible pour le système étudié.

Des travaux recherches ont été effectués par ABDERREZEK, FATHI, [50], sur l'effet de plusieurs types de poussières sur le comportement électrique et thermique des panneaux photovoltaïques : les variations des paramètres physiques (taille et type de grain), du niveau de transmission de la lumière et de la température du vitrage entraînent une modification des performances du panneau photovoltaïque. Sur le même sujet, SAIDAN et al. [51], ont mené une étude sur l'impact de l'accumulation de poussière sur 3 modules solaires photovoltaïques avec une exposition directe aux conditions météorologiques, dans une configuration expérimentale bien contrôlée : le dépôt de poussière sur la surface des modules solaires photovoltaïques entraîne une réduction d'efficacité des modules PV de 10 à 16% selon le taux et le type d'empoussièrément.

L'évolution mensuelle des énergies produites par les panneaux solaires photovoltaïques est présentée dans le graphe ci-dessous :

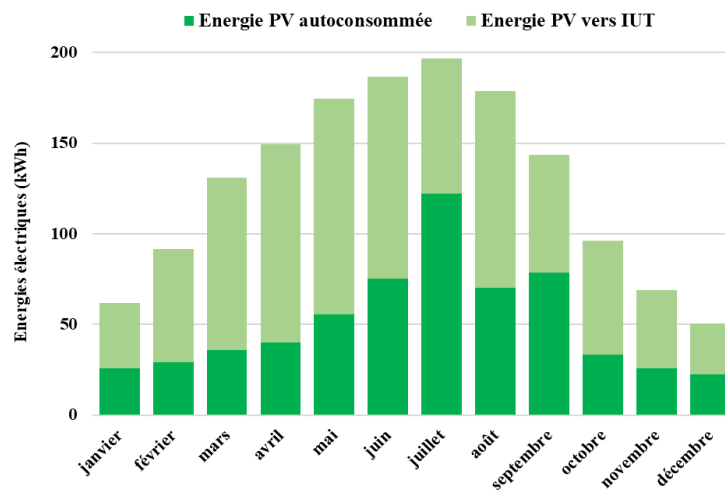


Figure 4-23. Énergie produite par les PV sur l'année 2020

Ces énergies produites sont quatre fois plus importantes en juillet qu'en décembre du fait de l'ensoleillement qualifié par \bar{H}_0 et de l'indice de clarté K_T qui varient d'un facteur de 3,7 et de 1,5 respectivement. Les quatre panneaux inclinés à 15° favorisent la production d'énergie en été et les deux autres inclinés à 45° en toiture favorisent la production d'énergie en hiver.

6.2. Ballon ECS électro-solaire

Le besoin d'ECS est assuré par le ballon d'ECS électro-solaire de 250 l relié à un panneau thermique en toiture.

L'évolution de la température intérieure du ballon au cours de l'année 2020 (figure 4-24) a pu être obtenue par l'ajout d'une sonde de température dans un tube plongeur au centre du ballon, reliée au système KNX. La sonde affiche une température maximale inférieure à celle fixée par le constructeur (85 °C) du fait du gradient de température dans le ballon. La chute de température du ballon observée le 18/11/2020 est due à une consommation excessive accidentelle d'ECS.

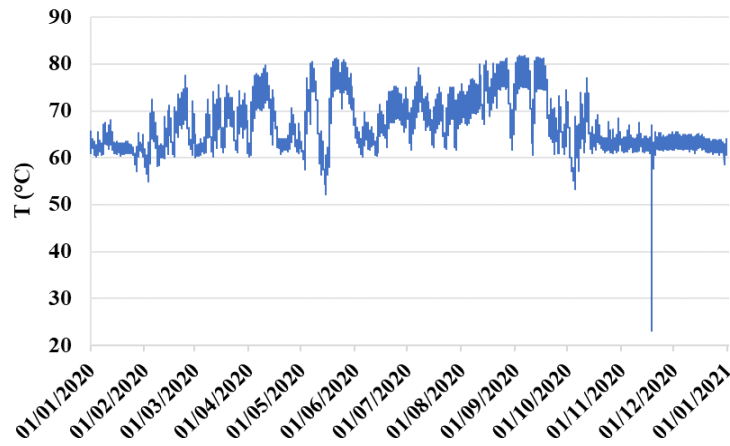


Figure 4-24. Évolution de la température du ballon ECS en 2020

Le volume réel consommé s'écarte du volume prévisionnel défini par les scénarios présentés dans la partie 3. En effet, le temps d'ouverture de l'électrovanne est programmé pour répondre aux besoins simulés de puisage. En mai, le robinet resté accidentellement fermé a réduit la consommation d'ECS à 4 jours seulement. En octobre et novembre, un dysfonctionnement a maintenu l'électrovanne ouverte générant ainsi une surconsommation accidentelle.

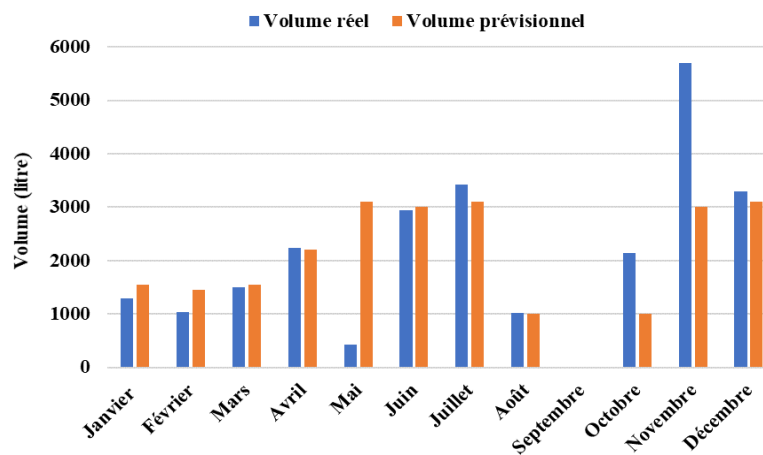


Figure 4-25. Volumes mensuels d'eau chaude sanitaire consommée en 2020

Les énergies mensuelles produites par le panneau thermique et par la résistance électrique comparées aux besoins mensuels (énergie ECS consommée) sont présentées dans la figure 4-26 :

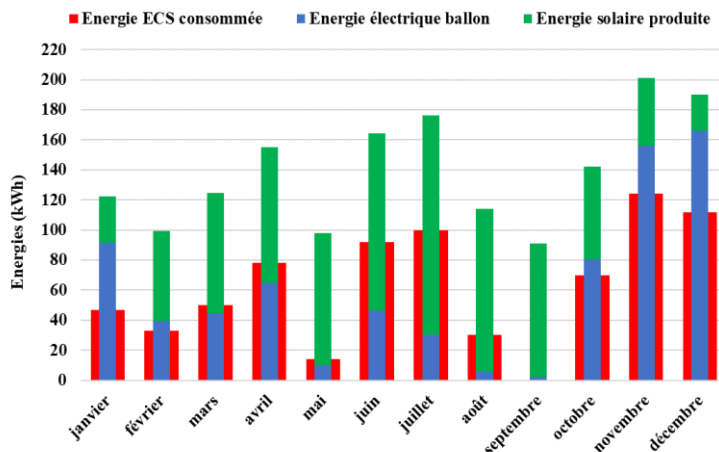


Figure 4-26. Énergie produite et consommée ECS en 2020

L'énergie solaire fournie (en vert) couvre les besoins d'ECS (en rouge) pour les mois de février à septembre. Le besoin d'ECS est (principalement) caractérisé par les volumes d'ECS consommée représentés dans la figure 4-25.

La part d'énergie fournie par le capteur solaire par rapport à la production totale d'énergie fournie au ballon ECS (solaire + électrique), figure 4-27, met en évidence des valeurs dépassant 80% pour les mois de mai - juillet - août et septembre du fait du fort ensoleillement d'été et des consommations nulles en août et septembre. En hiver (novembre, décembre et janvier), cette part varie mensuellement entre 8% et 25%. En mi-saison (février - avril et octobre), la part mensuelle d'énergie solaire varie de 35% à 65%.

La part annuelle d'énergie solaire est ainsi de 56% de la production totale d'énergie transmise au ballon d'ECS. Donc les 2 m² de ce capteur apparaissent ainsi bien dimensionnés pour répondre aux besoins d'ECS simulés.

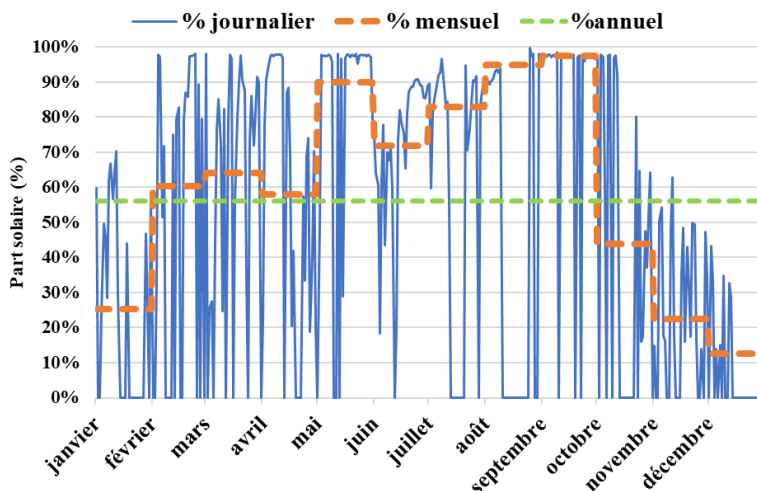


Figure 4-27. Part du solaire dans la production d'ECS

L'évolution de l'efficacité brute journalière du panneau thermique définie par le rapport de l'énergie transmise au ballon au produit de l'irradiation mesurée par la station météo sur un plan horizontal par la surface du panneau thermique est présentée sur la figure 4-28 :

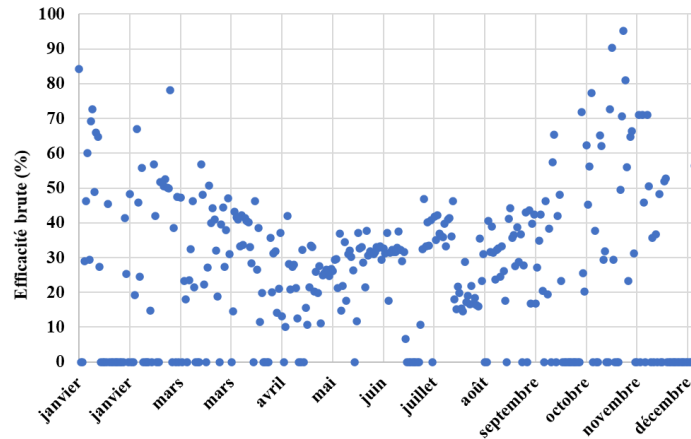


Figure 4-28. Évolution de l'efficacité brute journalière du panneau thermique

On observe une courbe enveloppe de même type que celle observée dans l'étude des panneaux solaires photovoltaïques. Cette allure de courbe s'explique par l'inclinaison à 45° du panneau thermique orienté sud et donc suit la même évolution que celle du rapport \bar{R}_b (rapport du rayonnement direct sur un plan incliné à 45° orienté sud au rayonnement sur un plan horizontal). La disparité des points au-dessous de cette courbe enveloppe est due aux faibles énergies journalières transmises du fait de la présence de la résistance électrique compensant le besoin et de la température de capteur fortement influencée par la température extérieure et par les effets du vent et de la pluie.

A partir des énergies mensuelles fournies par le panneau thermique et des énergies reçues sur le plan incliné à 45° (paragraphe 6.1), le rendement moyen mensuel réel est évalué (figure 4-29).

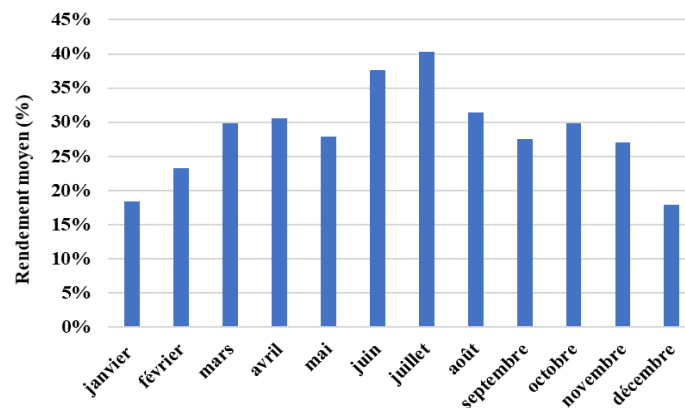


Figure 4-29. Rendement moyen mensuel du capteur thermique en 2020

Ces rendements mensuels varient de 17% à 40% et prennent les valeurs les plus grandes pour les mois de juin-juillet pour lesquels les volumes journaliers de puisage étaient les plus importants. Ces valeurs maximum correspondent aux valeurs classiquement utilisés dans les outils usuels de simulation de dimensionnement d'installations solaires (CalSol). Ces variations réelles dépendent des volumes de puisage journalier mais également des conditions météorologiques réelles.

La différence de l'énergie reçue par le ballon (résistance + solaire) avec l'énergie fournie (pour le puisage d'ECS) correspond à l'énergie dissipée par l'équipement de production d'ECS. Cette énergie est évaluée mensuellement et représentée sur la figure 4-30.

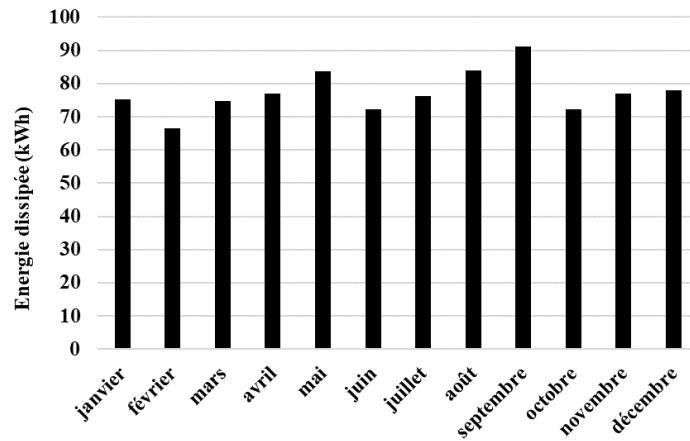


Figure 4-30. Énergie mensuelle dissipée par le système de production d'ECS en 2020

Cette énergie mensuelle dissipée est due à la dissipation propre au ballon solaire et à son équipement de production de chaleur. Les dissipations mensuelles importantes des mois de mai, août et septembre s'expliquent par les très faibles consommations d'ECS, les forts apports solaires (figure 4-26) et les températures élevées du ballon (figure 4-24). La forte dissipation du janvier s'explique par la température intérieure de consigne fixée à 18 °C.

Les pertes brutes de stockage annuelles [55] s'expriment en Wh selon l'Éq. 4-1 ci-dessous en considérant une durée de stockage en heures égale à 8760-durvac, durvac étant la durée des vacances où le ballon n'est pas utilisé :

$$Qg_a(Wh) = \left[\frac{Vs \cdot Cr \cdot (\theta_{ecs0} - \theta_{amb})}{24} \right] (8760 - durvac) \quad [\text{Éq. 4-9}]$$

Avec :

Vs : volume de stockage (l)

Cr : constante de refroidissement (Wh/l.K.jour)

θ_{ecs0} : température de stockage d'ECS, voisine de 65 °C

θ_{amb} : température du local où est situé le stockage, prise égale à 20 (°C)

Pour la période entre le 01/12/2020 et 17/12/2020, la consigne de la température intérieure est de 20 °C. D'après les mesures, la température intérieure moyenne journalière est de 20 °C et celle du ballon est de 64 °C. On observe une chute de température journalière de ballon variant entre 2,00 °C et 2,10 °C sur une durée de 7,5 h (de 23h00 à 06h30) sur la période de non-fonctionnement de la résistance électrique du ballon (de 22h00 et 06h30). Cette chute de température est corrélée à la constante de refroidissement du ballon Cr car la température moyenne du ballon se définit par l'expression :

$$\theta_{ecs}(t) = \theta_{amb} + (\theta_{ecs0} - \theta_{amb}) * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [\text{Éq. 4-10}]$$

Avec :

$$\tau = \frac{C_{eau}}{Cr}; C_{eau} = 1,16 \text{ Wh}/(l. K) \quad [\text{Éq. 4-11}]$$

θ_{ecs} = température initiale de stockage d'ECS, °C.

Donc Cr s'évalue par l'expression ci-dessous :

$$Cr = \frac{C_{eau}}{\Delta t} * \ln \left(\frac{\theta_{ecs0} - \theta_{amb}}{\theta_{ecs0} - \Delta\theta_{ecs} - \theta_{amb}} \right) \quad [\text{Éq. 4-12}]$$

$$Cr \simeq \frac{C_{eau}}{\Delta t} * \frac{\Delta\theta_{ecs}}{(\theta_{ecs} - \theta_{amb})_{moyen}} \quad \text{si } \Delta\theta_{ecs} \ll (\theta_{ecs} - \theta_{amb})_{moyen}$$

Avec :

$\Delta\theta_{ecs}$ = chute de température de l'ECS pendant la durée Δt en jour.

| | θ_{ecs0} à 23h00 | θ_{amb} à 23h00 | θ_{ecs} à 06h30 | θ_{amb} à 06h30 | $\Delta\theta_{ecs}$ | $(\theta_{ecs} - \theta_{amb})$ moyen | Cr | |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|--|------|-------|
| 01/12/2020 | 64,7 | 19,8 | 02/12/2020 | 62,6 | 19,2 | 2,1 | 43,9 | 0,177 |
| 02/12/2020 | 64,6 | 20,1 | 03/12/2020 | 62,5 | 19,5 | 2,1 | 43,6 | 0,178 |
| 03/12/2020 | 64,5 | 20,2 | 04/12/2020 | 62,5 | 20,8 | 2,0 | 43,0 | 0,173 |
| 04/12/2020 | 64,6 | 20,3 | 05/12/2020 | 62,5 | 19,9 | 2,1 | 43,7 | 0,179 |
| 05/12/2020 | 64,4 | 20,1 | 06/12/2020 | 62,4 | 19,8 | 2,0 | 43,6 | 0,171 |
| 06/12/2020 | 64,6 | 20,2 | 07/12/2020 | 62,5 | 19,7 | 2,1 | 43,6 | 0,179 |
| 07/12/2020 | 64,6 | 20,4 | 08/12/2020 | 62,6 | 20,3 | 2,0 | 43,5 | 0,172 |
| 08/12/2020 | 64,6 | 20,2 | 09/12/2020 | 62,5 | 19,8 | 2,1 | 43,7 | 0,179 |
| 09/12/2020 | 64,2 | 19,9 | 10/12/2020 | 62,1 | 19,2 | 2,1 | 43,3 | 0,179 |
| 10/12/2020 | 64,6 | 19,7 | 11/12/2020 | 62,5 | 19,3 | 2,1 | 43,9 | 0,177 |
| 11/12/2020 | 64,6 | 20,4 | 12/12/2020 | 62,6 | 20,2 | 2,0 | 43,5 | 0,171 |
| 12/12/2020 | 63,7 | 20,2 | 13/12/2020 | 61,7 | 19,9 | 2,0 | 42,6 | 0,174 |
| 13/12/2020 | 64,4 | 20,1 | 14/12/2020 | 62,3 | 19,7 | 2,1 | 43,2 | 0,179 |
| 14/12/2020 | 64,7 | 21 | 15/12/2020 | 62,6 | 20,4 | 2,1 | 43,0 | 0,182 |

Tableau 4-4. Evolution de la constante de refroidissement du ballon sur les deux premières semaines de décembre

La constante moyenne du ballon est donc de 0,176 Wh/(l.j.K) et plus importante que celle énoncée par le constructeur à 0,128 Wh/(l.j.K).

On peut cependant évaluer une constante de dissipation énergétique C_d du système complet (ballon + résistance) à partir du bilan mensuel défini par la figure 4-26, des écarts moyens mensuels de $\theta_{ecs} - \theta_{amb}$ et de l'éq. 4-1 :

| | janv | fév | mars | avril | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Energie dissipée | 75 | 67 | 75 | 77 | 84 | 72 | 76 | 84 | 91 | 72 | 77 | 78 |
| $\theta_{ecs} - \theta_{amb}$ moyen | 42,9 | 43,6 | 44,4 | 45,0 | 45,3 | 41,3 | 42,9 | 44,2 | 48,3 | 41,6 | 41,1 | 41,8 |
| C_d | 0,226 | 0,211 | 0,217 | 0,228 | 0,239 | 0,234 | 0,229 | 0,245 | 0,252 | 0,224 | 0,250 | 0,241 |

Tableau 4-5. Constante moyenne mensuelle de dissipation du système ECS solaire

La constante de dissipation annuelle est donc évaluée à 0,233 Wh/(l.j.K). Cette valeur caractérise une dissipation réelle du système largement sous-évaluée par la seule valeur de la constante de refroidissement du ballon $C_r = 0,128 \text{ Wh/(l.j.K)}$ annoncée par le constructeur.

Cependant, l'analyse de l'énergie consommée par la résistance électrique peut laisser penser à des améliorations potentielles de l'équipement du ballon solaire du fait de la mise en route intempestive de la résistance. En effet, la résistance électrique se déclenche lorsque l'écart entre la température de consigne de l'ECS (60 °C) et la température de la sonde T6 en sortie de l'échangeur du ballon (voir figure 4-31) est plus grand qu'une valeur définie (fixée ici à sa valeur maximale de 25 °C). L'arrêt de fonctionnement de la résistance s'effectue lorsque la température de la sonde T6 est égale à la température de consigne.

La sonde T6 est installée sur la sortie de l'échangeur dans un capot de polystyrène (1 cm d'épaisseur) à l'extérieur du ballon. Cette sonde qui qualifie la température de l'eau du bas du ballon ECS est impactée par la température intérieure du bâtiment malgré le capot isolant.

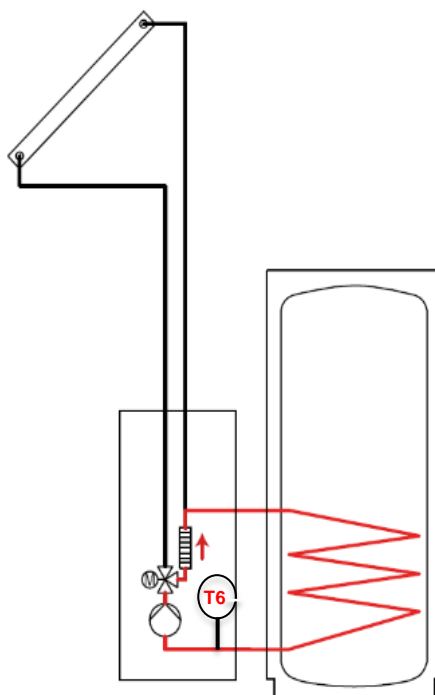


Figure 4-31. Schéma de l'appoint électrique du ballon ECS solaire

L'analyse des déclenchements de la résistance a pu s'effectuer grâce l'outil Grafana et l'instrumentation du ballon (puissance électrique, sonde de température rajoutée au milieu du ballon). La figure 4-32 montre sur la journée du 2 février 2020, la puissance électrique absorbée par la résistance et la température au milieu du ballon. On observe dix séquences de fonctionnement de la résistance dont trois sont dues aux puisages (7h00, 12h00 et 19h00), quatre de l'ordre de 15 à 20 min et d'autres de faibles durées. Ces dernières mises en route de la résistance électrique de faibles durées sont dues au refroidissement local de la sonde T6. Le fonctionnement de la résistance électrique asservi à la sonde de température intérieure du ballon limiterait certainement ces déclenchements intempestifs qui consomment de l'énergie au détriment de l'énergie que fournit gratuitement le panneau solaire.

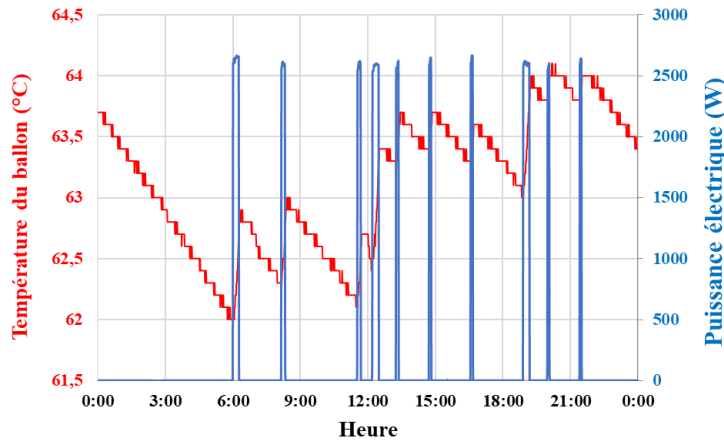


Figure 4-32. Évolution de la température du ballon et périodes de mise en route de la résistance électrique pour le 2 février 2020

Les durées de fonctionnement en minute de la résistance électrique sur l'année 2020, sont regroupées par nombre d'occurrence dans la figure 4-33. Le graphe montre que la résistance électrique a fonctionné 6212 min pour des durées comprises entre 2 min et 15 min ce qui correspond à 38% de la durée totale de fonctionnement. Ainsi, 38% de l'énergie fournie par la résistance est essentiellement due au refroidissement du conduit de l'échangeur situé en partie à l'extérieur du ballon et sur laquelle se trouve la sonde de température.

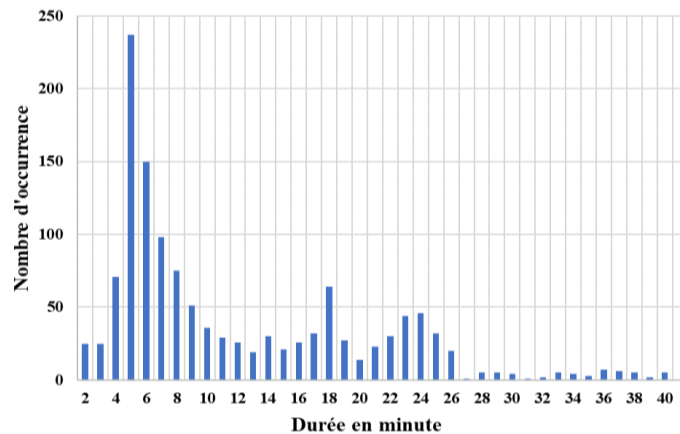


Figure 4-33. Nombre d'occurrence de la durée en minute de mise en fonctionnement de la résistance électrique

La gestion de la mise en fonctionnement de la résistance électrique par une sonde située au milieu du ballon permettrait de favoriser les apports solaires et réduire la consommation énergétique de l'ensemble.

Un potentiel d'économie annuelle de 38% sur la consommation énergétique par effet joule du ballon peut ainsi être envisagé par l'amélioration de la conception du ballon en termes d'isolation du groupe extérieur et de la sonde de température du ballon.

Une isolation renforcée du circuit extérieur du ballon a été effectuée le 24/03/2021 par le rajout d'isolant métisse® dans le capot en polystyrène tout autour du système comportant la résistance électrique pour ralentir le refroidissement du circuit extérieur et ainsi limiter les déclenchements intempestifs de la résistance de courtes durées.

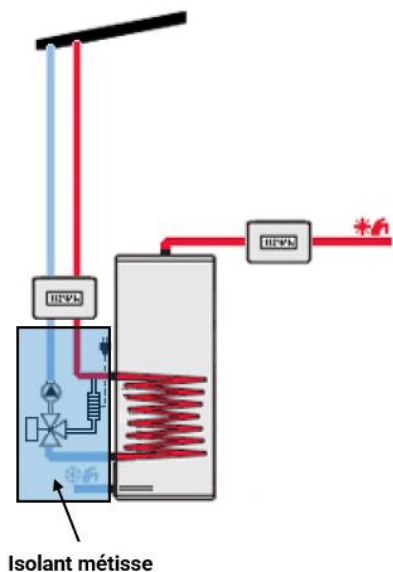


Figure 4-34. Sur isolation du système extérieur du ballon ECS par du métisse®

Dans le même principe présenté pour l'année 2020, nous avons regroupé sur la figure 4-35, le nombre d'occurrences de fonctionnement de la résistance électrique selon leur durée en minute sur les mois d'avril et mai de l'année 2021.

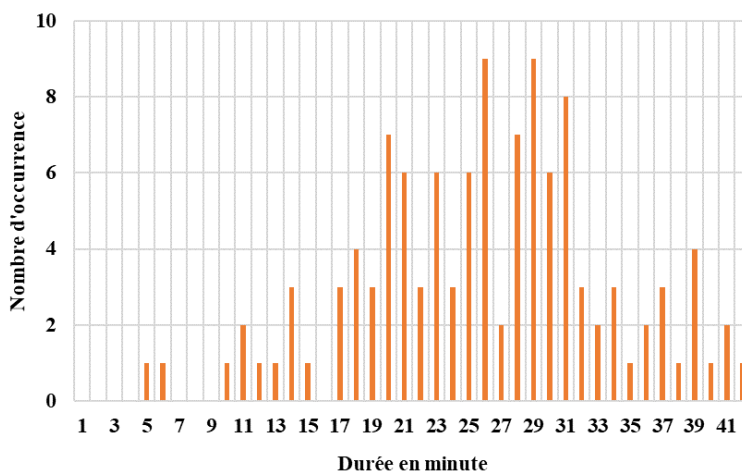


Figure 4-35. Nombre d'occurrence de fonctionnement de la résistance électrique en avril et mai 2021 selon leur durée en minute (après la sur isolation du capot extérieur)

La figure 4-35 montre un nombre faible des déclenchements de courte durée de la résistance électrique. Le cumul des durées de fonctionnement comprises entre 1 à 15 min est de 125 min et correspond à 4% du fonctionnement global pour ces deux mois (contre 38% sur l'année 2020) et justifie l'intérêt de l'isolation renforcée du système extérieur sur l'économie énergétique du ballon ECS.

Le coefficient de dissipation du système ECS est évalué sur les deux mois avril et mai 2021 est évalué à 0,166 Wh/(l.j.K) inférieur de 29% à celui de l'année 2020 (0,233 Wh/(l.j.K)).

Cette voie d'amélioration peut permettre à tous ceux qui disposent de tels équipements d'effectuer de réelles économies sur leur facture énergétique.

Le ballon ECS sur l'année 2020 dissipe en moyenne 2,7 kWh/j auxquels se rajoutent l'énergie dégagée par l'onduleur et les apports extérieurs. En hiver, ces apports réduisent la consommation de la PAC, l'annulent à la mi-saison mais induisent une surconsommation de la PAC en été.

6.3. Ventilation Mécanique Contrôlée Double Flux

La ventilation mécanique contrôlée double flux (VMC DF) permet de renouveler l'air intérieur du bâtiment. Nous l'avons équipée de 4 sondes de température positionnées sur les 4 bouches de la VMC : entrée et soufflage d'air neuf, aspiration et extraction de l'air vicié (Figure 4-36). La VMC DF permet d'échanger des calories entre le flux d'air vicié et flux d'air neuf. Le constructeur qualifie l'efficacité de l'échangeur à 92% définie par :

$$\varepsilon = \frac{T_s - T_e}{T_i - T_e} \quad [\text{Éq. 4-13}]$$

Avec :

T_s : température air soufflé

T_i : température air intérieur

T_e : température air neuf

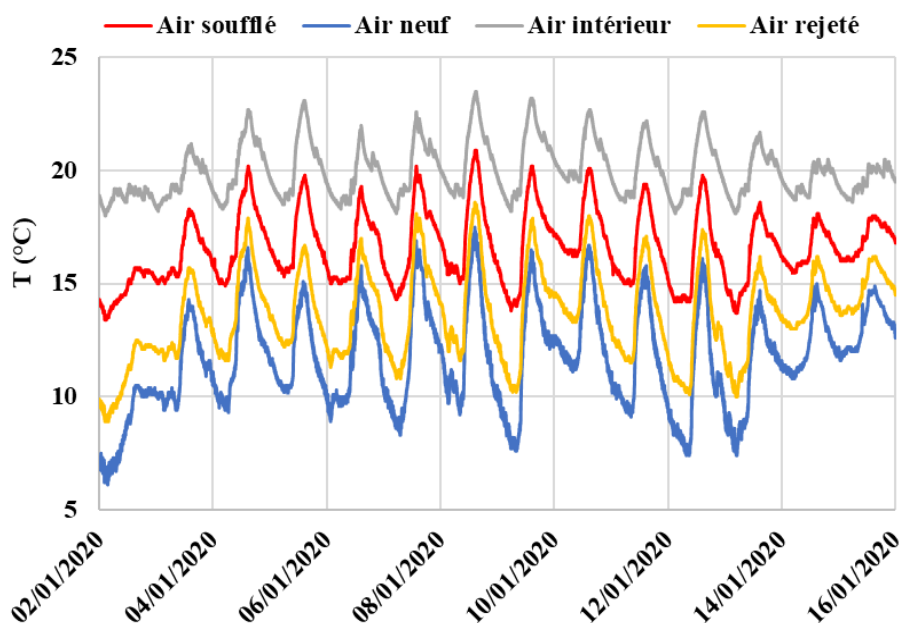


Figure 4-36. Évolution des températures de l'air des 4 conduits de la VMC du 02 janvier au 15 janvier 2020

Sur la figure 4-38, qui caractérise l'efficacité de la VMC sur l'année 2020 n'ont été présentés que les points pour laquelle la VMC DF est en mode d'échange de chaleur.

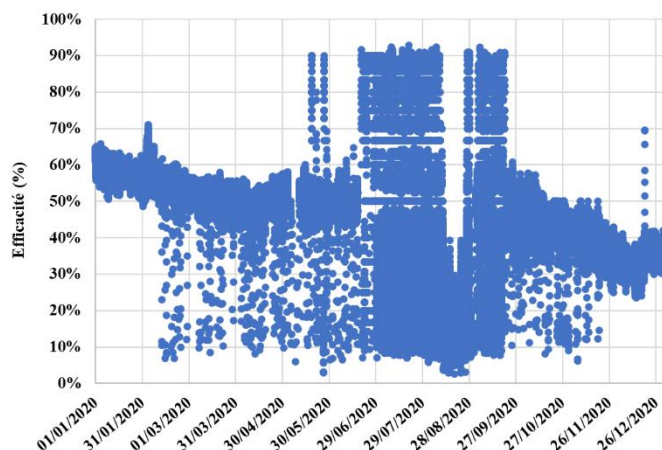


Figure 4-37. Efficacité brute de la VMC DF en 2020

Ces mesures présentent de fortes disparités hormis pour les mois de janvier et décembre. En effet, lorsque 2 des 3 températures sont très voisines, l’incertitude du coefficient d’efficacité devient artificiellement très grande. En considérant une précision de 0,1 °C des températures mesurées, la précision relative de l’efficacité s’exprime par :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = 0,1 * \left[\left| \frac{1}{T_s - T_e} \right| + \left| \frac{1}{T_s - T_e} - \frac{1}{T_i - T_e} \right| + \left| \frac{1}{T_i - T_e} \right| \right] \quad [\text{Éq. 4-14}]$$

Nous effectuons un traitement de la Figure 4-37 pour ne retenir que les points de précision relative inférieure à 10%. Ces points sont présentés sur la Figure 4-38 sur laquelle les moyennes mensuelles de l’efficacité sont affichées.

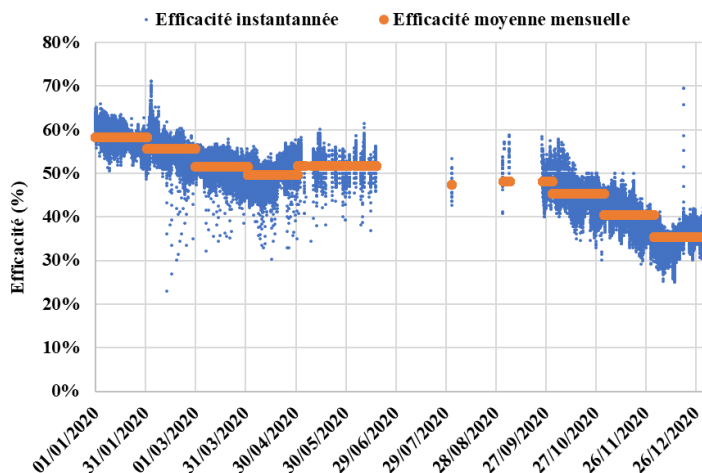


Figure 4-38. Efficacité en % de la VMC en 2020

L’efficacité, évaluée à partir des mesures réelles acquises chaque minute, est de l’ordre de 60% en janvier mais évolue tout au long de l’année du fait des fluctuations de la météorologie extérieure.

Les mesures montrent une disparité des points sur des instants particuliers comme le 12/02/2020 à 14h30 (sortie du mode By-pass) et surtout le 18/12/2020 de 15h18 à 15h30 (intervention humaine dans le bâtiment avec entrée d’air extérieur froid).

Nous observons une chute globale de l'efficacité de l'échangeur qui peut laisser penser à un besoin d'entretien de la VMC (nettoyage ou remplacement des filtres par exemple). L'efficacité moyenne annuelle est évaluée à 49%.

Dans des conditions particulières de mi-saison et d'été, le by-pass de la VMC est activé lorsque :

$$T^{\circ} \text{ intérieure} > T^{\circ} \text{ extérieure et } T^{\circ} \text{ intérieure} > 24^{\circ}\text{C et } T_{\text{ext.}} > 12^{\circ}\text{C}$$

La figure 4-39 montre des périodes d'activation du by-pass au mois de mai dans le but de rafraîchir le bâtiment avec l'air extérieur. Dans de tels cas, l'efficacité de la VMC s'effondre puisqu'il n'y a pas d'échange thermique entre les flux d'air et la puissance de la VMC augmente car les débits d'aspiration et d'extraction sont doublés. On observe sur cette figure, la mise en fonctionnement/arrêt de la fonction by-pass de la VMC DF par les décrochements que subissent les températures d'air soufflé (à l'intérieur) et d'air extrait (rejeté à l'extérieur).

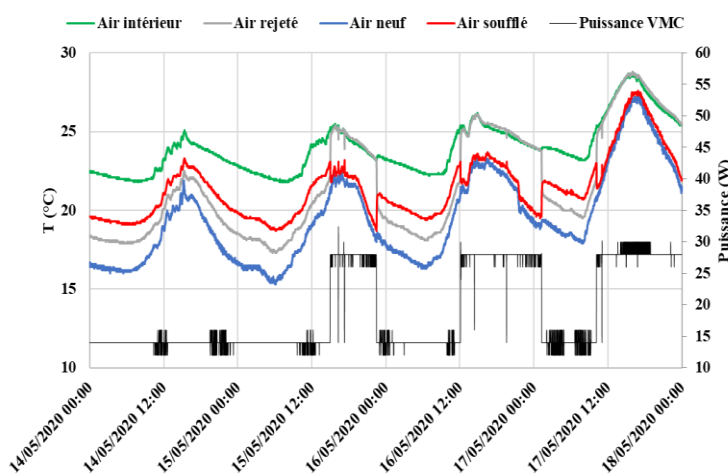


Figure 4-39. Fonction de by-pass de la VMC du 14 mai au 18 mai 2020

- Fonctionnement si $T_i > 24^{\circ}\text{C}$ avec $T_i > T_e$ et $T_e > 12^{\circ}\text{C}$

Les débits d'air extrait et d'air soufflé sont alors doublés ($120\text{ m}^3/\text{h}$ en total).

- Arrêt si $T_i < 24^{\circ}\text{C}$ ou $T_i < T_e$ ou $T_e < 12^{\circ}\text{C}$

Les débits d'air extrait et d'air soufflé retrouvent leur valeur de base ($60\text{ m}^3/\text{h}$ en total).

La figure 4-39 met en évidence trois périodes du fonctionnement de la VMC en mode by-Pass du 14 mai au 18 mai : entre 15h00 et 22h35 le 15 mai, entre 12h00 le 16 mai et 01h00 le 17 mai puis au-delà de 10h00. On observe que la température de l'air soufflé est sensiblement celle de l'air extérieur : l'écart de température entre l'air soufflé et l'air neuf observé est voisin de $0,5^{\circ}\text{C}$ (en moyenne) du fait des pertes thermiques du ventilateur de soufflage.

Le by-Pass permet à l'air intérieur de ne pas se réchauffer autant qu'en fonctionnement DF classique (échange thermique entre les flux d'air) comme on peut le voir sur la figure 4-39. L'identification des périodes de mise en mode by-Pass de la VMC s'effectue facilement par les mesures de la puissance instantanée de la VMC (voir figure 4-39). Mois par mois, nous avons pu analyser les durées de fonctionnement de la VMC en mode by-pass (figure 4-40).

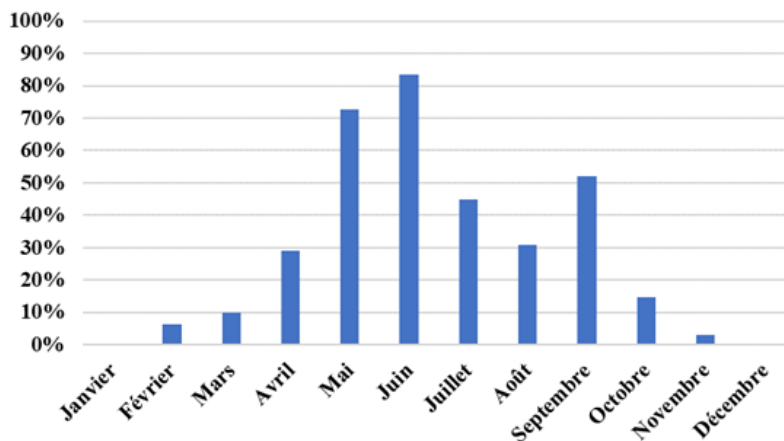


Figure 4-40. Part relative mensuelle de mise en mode by-pass de la VMC

Il apparaît donc sur la figure 4-40 une très faible part relative de fonctionnement de la VMC en mode by-pass pour les mois d'hiver en mode chauffage (janvier à mars, novembre et décembre) du fait que la température intérieure dépasse rarement les 24 °C. En mode rafraîchissement des mois les plus chauds, l'occurrence de fonctionnement en by-pass est plus élevée pour faciliter le rafraîchissement de l'air intérieur : au mois de juin, le fonctionnement en by-pass s'est effectué à 82% du temps.

Dans le cas du mode de fonctionnement de la VMC en échange double flux, l'énergie que la VMC échangée sur l'air extrait s'évalue à partir de l'écart de température entre l'air soufflé et l'air neuf. Dans le cas du mode by-pass, l'énergie évacuée s'évalue à partir de l'écart de température de l'air soufflé et l'air intérieur extrait. Les débits d'air totaux sont de 60 m³/h en mode normal et 120 m³/h en mode by-pass. La figure 4-41 présente les bilans énergétiques mensuels de la VMC DF en 2020, vis-à-vis de l'énergie électrique consommée, de l'énergie fournie au bâtiment en mode DF et de l'énergie cédée en mode by-pass.

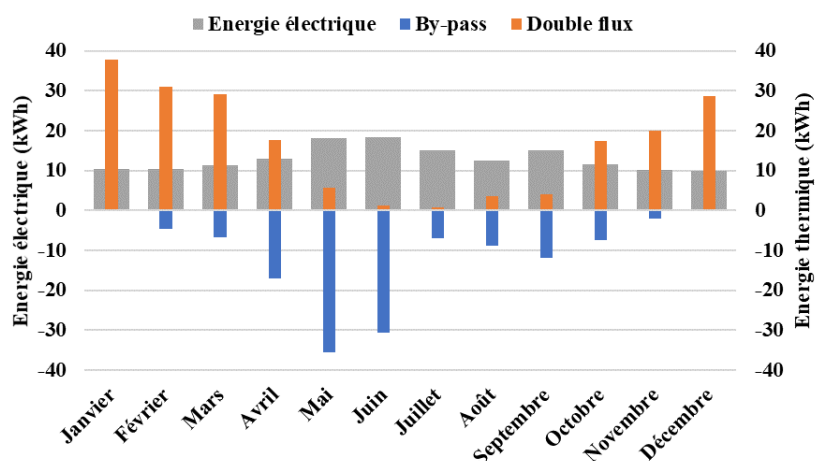


Figure 4-41. Énergies mensuelles échangées par la VMC en 2020

On observe que les énergies sont fournies au bâtiment principalement en hiver via l'échangeur DF contribuant efficacement aux économies énergétiques du bâtiment. En définissant un ratio mensuel d'efficacité énergétique de la VMC DF par le rapport de l'économie énergétique avec la consommation

d'énergie électrique, ce ratio prend les valeurs de 3,7 et 2,9 en janvier et décembre respectivement. Les énergies cédées du bâtiment par le mode by-pass de la VMC sont importantes aux mois de mai et juin (vis-à-vis des mois juillet à septembre) du fait des faibles températures extérieures nocturnes. Les ratios mensuels d'échanges énergétiques pour le mois de mai et juin sont 2 et 1,7 respectivement.

6.4. Bâtiment

6.4.1. Comportement énergétique mensuel

La comparaison mensuelle des énergies produites par les panneaux solaires photovoltaïques aux énergies électriques consommées par les différents équipements du bâtiment expérimental nous permet de dresser le graphe ci-dessous :

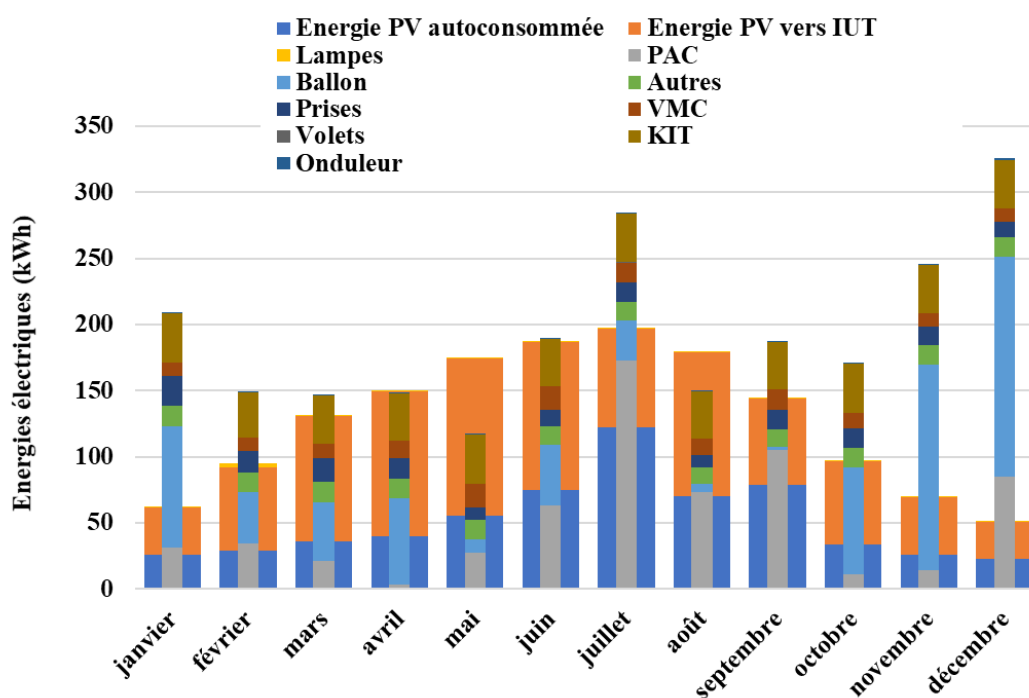


Figure 4-42. Énergies mensuelles consommées par équipement et produites par les PV en 2020

Le bâtiment est à énergie positive pour les mois d'avril, mai et août 2020. La PAC et le ballon d'eau chaude sanitaire sont les deux systèmes les plus consommateurs d'énergie.

6.4.2. Impact du comportement de l'utilisateur

L'année 2020 a été divisée en 43 scénarios hebdomadaires de l'occupant (issus du calendrier présenté dans la figure 4-4), définis par la position des volets, la température intérieure de consigne et la consommation d'ECS.

Ces scénarios sont regroupés dans le tableau 4-2 :

| Scénario | Jour 1 | Jour 7 | Température de consigne | Position volets |
|----------|------------|------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 01/01/2020 | 07/01/2020 | 18 °C | ouvert |
| 2 | 10/01/2020 | 16/01/2020 | | fermé |
| 3 | 17/01/2020 | 23/01/2020 | | fermé |
| 4 | 25/01/2020 | 31/01/2020 | | mi-ouvert |
| 5 | 17/02/2020 | 23/02/2020 | 21 °C | fermé |
| 6 | 26/02/2020 | 03/03/2020 | | ouvert |
| 7 | 04/03/2020 | 10/03/2020 | | ouvert |
| 8 | 11/03/2020 | 17/03/2020 | | ouvert |
| 9 | 18/03/2020 | 24/03/2020 | | ouvert |
| 10 | 25/03/2020 | 31/03/2020 | | ouvert |
| 11 | 01/04/2020 | 07/04/2020 | | fermé |
| 12 | 08/04/2020 | 14/04/2020 | | fermé |
| 13 | 15/04/2020 | 21/04/2020 | | fermé |
| 14 | 22/04/2020 | 28/04/2020 | | fermé |
| 15 | 01/05/2020 | 07/05/2020 | ouvert | |
| 16 | 08/05/2020 | 14/05/2020 | ouvert | |
| 17 | 17/05/2020 | 23/05/2020 | 26 °C | ouvert |
| 18 | 24/05/2020 | 30/05/2020 | | ouvert |
| 19 | 31/05/2020 | 06/06/2020 | | ouvert |
| 20 | 12/06/2020 | 18/06/2020 | | fermé |
| 21 | 22/06/2020 | 28/06/2020 | | ouvert |
| 22 | 29/06/2020 | 05/07/2020 | | ouvert |
| 23 | 08/07/2020 | 14/07/2020 | | fermé |
| 24 | 22/07/2020 | 28/07/2020 | | mi-ouvert |
| 25 | 02/08/2020 | 08/08/2020 | | fermé |
| 26 | 10/08/2020 | 16/08/2020 | | fermé |
| 27 | 17/08/2020 | 23/08/2020 | fermé | |
| 28 | 26/08/2020 | 01/09/2020 | fermé | |
| 29 | 02/09/2020 | 08/09/2020 | 24 °C | fermé |
| 30 | 09/09/2020 | 15/09/2020 | | fermé |
| 31 | 16/09/2020 | 22/09/2020 | | ouvert |
| 32 | 23/09/2020 | 29/09/2020 | | ouvert |
| 33 | 30/09/2020 | 06/10/2020 | | ouvert |
| 34 | 07/10/2020 | 13/10/2020 | | ouvert |
| 35 | 14/10/2020 | 20/10/2020 | | ouvert |
| 36 | 21/10/2020 | 27/10/2020 | | ouvert |
| 37 | 28/10/2020 | 03/11/2020 | | ouvert |
| 38 | 04/11/2020 | 10/11/2020 | | ouvert |
| 39 | 11/11/2020 | 17/11/2020 | ouvert | |
| 40 | 20/11/2020 | 26/11/2020 | 20 °C | ouvert |
| 41 | 27/11/2020 | 03/12/2020 | | ouvert |
| 42 | 04/12/2020 | 10/12/2020 | | ouvert |
| 43 | 11/12/2020 | 17/12/2020 | | ouvert |

Tableau 4-6. Scénarios hebdomadaires de l'occupant en 2020

La rigueur climatique hebdomadaire est évaluée par le calcul des degrés heures hebdomadaires (DH_{heb}) issus des écarts (positifs) de la température extérieure à la température de consigne définie par l'occupant (18 °C, 20 °C et 21 °C en mode chauffage et 26 °C et 24 °C en mode rafraîchissement).

La pompe à chaleur absorbe une énergie électrique pour fournir une énergie thermique (calorifique ou frigorifique) afin de vaincre la rigueur climatique soumise au bâtiment (en tenant compte des apports externes et internes) et maintenir une température intérieure définie par la consigne.

La figure 4-43 présente pour les 43 scénarios les DH_{heb} , les énergies hebdomadaires fournies et consommées de la PAC. Les fonds colorés définissent les températures intérieures de consigne et la position des volets caractérisés par des points noirs, jaunes ou oranges selon la position des volets fermés, ouverts ou mi-ouverts respectivement sur la courbe des DH_{heb} .

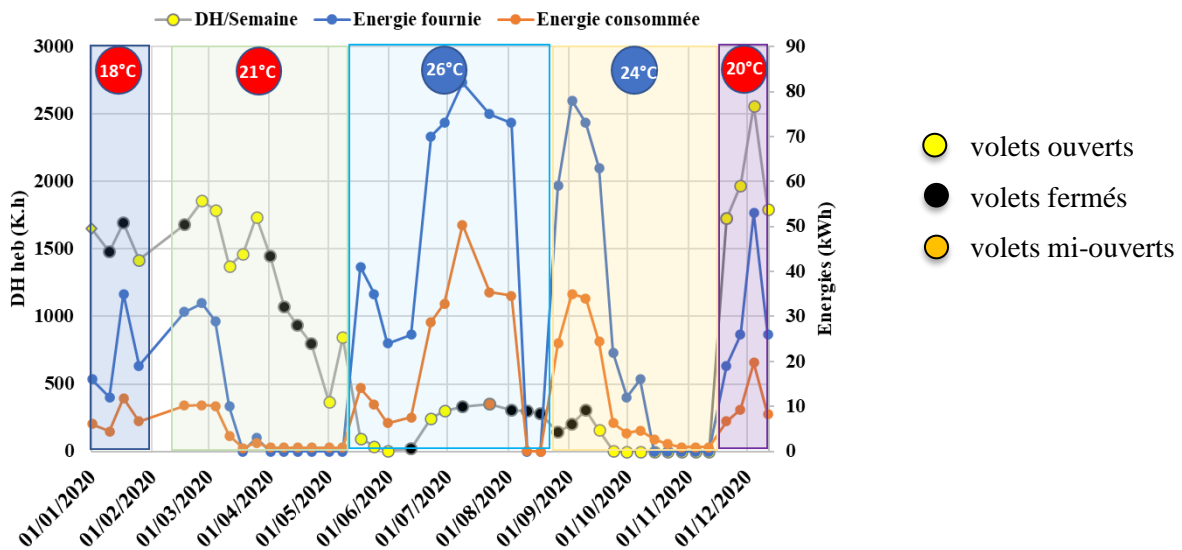


Figure 4-43. Degrés heures hebdomadaires et énergies hebdomadaires fournies et consommées par la PAC pour chacun des 43 scénarios de l'année 2020

L'analyse du comportement de la PAC selon la rigueur climatique va permettre d'évaluer le coefficient de déperdition thermique H du bâtiment dû aux échanges thermiques par les parois, les ponts thermiques et le renouvellement d'air. En effet, pour une durée donnée, le bilan énergétique du bâtiment s'exprime par la relation ci-dessous :

$$E_{PAC} = \text{Apports Ext} + \text{Apports Int} + \int H * (T_{int} - T_{ext}) dt \quad [\text{Éq. 4-15}]$$

E_{PAC} : Énergie fournie par la PAC (kWh)

H : Coefficient de déperdition du bâtiment (W/K)

dt : pas d'intégration sur la durée étudiée (kh)

Les apports externes sont principalement dus aux parois vitrées exposées au rayonnement solaire, et marginalement aux parois opaques. Les apports internes sont ceux dus aux divers équipements du bâtiment (ballon ECS, onduleur, ordinateur...)

En mode chauffage, une même température de consigne est définie pour 4 semaines consécutives. Trois niveaux de température intérieure de consigne sont présentés dans le tableau 4-3 qui définit l'énergie produite, le COP de la PAC, la rigueur climatique DH_{heb} et la position des volets pour chacun des 12 scénarios.

| T °C Consigne | Scénario | COP/semaine | COP moyen | DH _{heb} (K.h) | DH (K.h) | E produite (kWh) | Position des volets |
|------------------|----------|-------------|--------------|----------------------------|-------------|---------------------|------------------------|
| 18 °C | 1 | 2,62 | 2,82 | 1646 | 6235 | 16 | ouvert |
| | 2 | 2,72 | | 1477 | | 12 | fermé |
| | 3 | 2,95 | | 1692 | | 35 | fermé |
| | 4 | 2,85 | | 1420 | | 19 | mi-ouvert |
| 21 °C | 5 | 3,04 | 3,02 | 1678 | 7114 | 31 | fermé |
| | 6 | 3,20 | | 1858 | | 33 | ouvert |
| | 7 | 2,87 | | 1897 | | 29 | ouvert |
| | 8 | 2,86 | | 1376 | | 10 | ouvert |
| 20 °C | 40 | 2,83 | 2,82 | 1729 | 8056 | 19 | ouvert |
| | 41 | 2,80 | | 1970 | | 26 | ouvert |
| | 42 | 2,69 | | 2562 | | 53 | ouvert |
| | 43 | 3,17 | | 1794 | | 26 | ouvert |

Tableau 4-7. Description des 12 scénarios hebdomadaires en mode chauffage

A partir des données du tableau 4-5, on peut tracer l'évolution de l'énergie produite en mode chauffage par la PAC avec la rigueur climatique à combattre qu'expriment les DH de la semaine (figure 4-44). Les points sont représentés de couleur différente selon la consigne de la température intérieure et cerclés en rouge pour une position fermée des volets en journée.

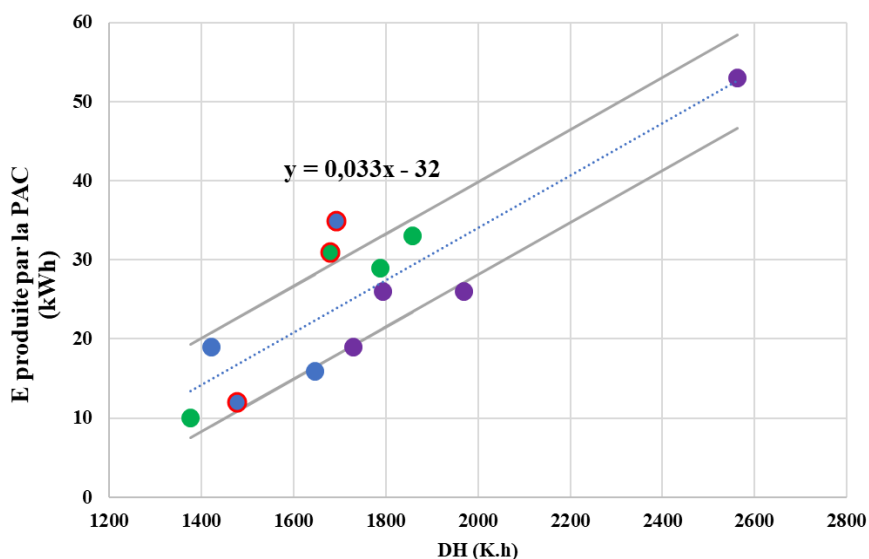


Figure 4-44. Énergie produite par la PAC selon la rigueur climatique pour chacun des scénarios d'hiver

Le nuage de points se situe autour de la droite exprimant la relation affine de l'énergie produite avec les DH. La constante ici négative de valeur « -32 (kWh) » traduit les apports hebdomadaires moyens internes et externes qui contribuent à réduire le besoin énergétique de chauffage. Les points se situent plus ou moins dans le faisceau de deux droites écartées de la courbe tendance moyenne de l'écart type des points expérimentaux.

Les écarts des points à la droite moyenne traduisent la variation des apports gratuits d'origine solaire (vitrage, ballon, onduleur) mais également l'effet d'inertie du bâtiment vis-à-vis des jours antérieurs et principalement des nuits peu froides.

La pente de la courbe de tendance moyenne qualifie la déperdition du bâtiment par les parois, les ponts thermiques et la ventilation. Cette valeur moyenne est estimée à 33 W/K (± 6).

Les scénarios 3 et 5 pour lesquels les volets ont été en position fermée (points cerclés de rouge) sont bien au-dessus du faisceau moyen (contreproductif). Le scénario 2 ayant le même comportement d'usager est caractérisé par un point situé en dessous de la courbe moyenne du fait d'une météo favorable : fortement ensoleillée, sans vent ni pluie. A contrario, la semaine du scénario 3 a été très faiblement ensoleillée, venteuse et pluvieuse.

L'impact de l'occupant sur les consommations énergétiques du bâtiment par la gestion de ses volets en hiver peut donc être significatif ou peu significatif selon un facteur amplificateur de la météorologie. L'impact de l'occupant sur les consommations de la PAC par la gestion de sa consigne de la température intérieure est là aussi influencé par la température de l'air extérieur. En effet, les points du graphe relatifs aux scénarios de consigne à 18 °C ne sont pas systématiquement ceux représentatifs d'une faible consommation (ni ceux de consigne à 21 °C d'une forte consommation).

Deux niveaux de température intérieure de consigne en mode rafraîchissement sont présentés dans le tableau 4-5 qui définit l'énergie produite, le COP de la PAC, la rigueur climatique DH_{heb} et la position des volets pour chacun des 14 scénarios.

| T°C Consigne | Scénario | COP/semaine | DH_{heb} (K.h) | E produite (kWh) | Position des volets |
|-----------------|----------|-------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| 26 °C | 17 | 2,91 | 98 | 41 | ouvert |
| | 18 | 3,34 | 39 | 35 | ouvert |
| | 19 | 3,79 | 4 | 24 | ouvert |
| | 20 | 3,43 | 22 | 26 | fermé |
| | 21 | 2,43 | 246 | 70 | ouvert |
| | 22 | 2,22 | 301 | 73 | ouvert |
| | 23 | 1,63 | 334 | 82 | fermé |
| | 24 | 2,12 | 354 | 75 | mi-ouvert |
| | 25 | 2,11 | 304 | 73 | fermé |
| 24 °C | 28 | 2,46 | 143 | 59 | fermé |
| | 29 | 2,23 | 202 | 78 | fermé |
| | 30 | 2,15 | 303 | 73 | fermé |
| | 31 | 2,59 | 157 | 63 | ouvert |
| | 32 | 3,51 | 5 | 22 | ouvert |

Tableau 4-8. Description des 14 scénarios hebdomadaires en mode rafraîchissement

De la même façon que pour le mode chauffage, la figure 4-45 traduit l'évolution de l'énergie produite par la PAC en mode rafraîchissement pour chaque scénario d'été (Tableau 4-8). Les points cerclés en rouge désignent une position ouverte des volets en journée et les couleurs désignent les niveaux de température de consigne différents.

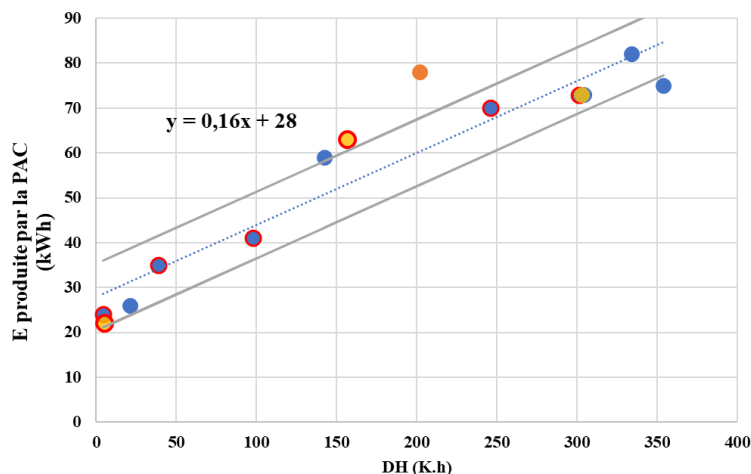


Figure 4-45. Énergie produite par la PAC selon la rigueur climatique pour chacun des scénarios d'été

On observe une répartition des points de la figure 4-45 autour d'une courbe tendance linéaire dont la pente traduit l'augmentation du besoin de rafraîchissement du bâtiment due à l'augmentation de la rigueur climatique d'été. Un point particulier s'écarte du faisceau de deux droites d'écart : il correspond au scénario 29 de température de consigne 24 °C qui fait immédiatement suite au scénario 28 dont la température de consigne était fixée à 26 °C. La charge thermique supplémentaire à vaincre est due à la chaleur emmagasinée par le bâtiment à la température de consigne 26 °C, caractérisé par l'inertie thermique du bâtiment.

La pente de la courbe de tendance moyenne qualifie les apports thermiques du bâtiment par les parois, les ponts thermiques et la ventilation. Cette valeur moyenne est estimée à 160 W/K (± 8). Cette valeur caractéristique du bâtiment en été est à mettre en regard avec celle obtenue en hiver. Ainsi la variation d'énergie à fournir due à une même variation de rigueur climatique par la pompe à chaleur pour les scénarios d'été apparaît environ 5 fois supérieure à celle d'hiver.

En été, la durée moyenne de fonctionnement de la pompe à chaleur est de l'ordre de dix heures par jour, principalement en période diurne. La pompe s'arrête lorsque la température de consigne est atteinte, du au rafraîchissement de plancher, à la baisse de la température extérieure et la chute des apports internes (onduleur) et les apports externes (solaires). La circulation d'eau dans le plancher étant maintenue, la température du plancher augmente progressivement du fait des échanges thermiques entre l'ambiance intérieure et le plancher.

Le plancher transmet en effet beaucoup plus difficilement ses frigories à l'ambiance intérieur en été que ses calories en hiver du fait de la densité de l'air froid plus importante que celle de l'air chaud. Même si la température du plancher en été est basse, la température intérieure mesurée a des difficultés à atteindre la consigne visée du fait de la stratification de l'air intérieur et des apports internes permanents évalués environ à 28 kWh par semaine composés de :

- L'énergie dissipée par le ballon (décrite en 6.2. ci-dessus) qui correspond environ à 18,9 kWh/semaine,
- L'énergie dissipée par l'onduleur qui est équivalente environ 10% de l'énergie produite par les PV soit 4,4 kWh/semaine en été et 1,1 kWh/semaine en décembre,
- 15% de pertes thermiques de la VMC environ 0,5 kWh/semaine en juillet,
- L'énergie dissipée par les autres appareils soit 2 kWh/semaine,

- 30% de pertes thermiques du circulateur du KIT (module hydraulique) environ 2 kWh/semaine.

En été comme en hiver, l'impact de l'occupant sur les consommations énergétiques du bâtiment par la gestion de ses volets semble difficilement quantifiable expérimentalement, comme celui sur les consommations de la PAC par la gestion de la consigne de la température intérieure qui sont influencées par les apports internes et externes.

7. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, le scénario météorologique du bâtiment expérimental est présenté pour l'année 2020 et confronté au scénario conventionnel de la RT 2012 pour la zone climatique H3 dédiée. La climatologie réelle apparaît tant en période estivale qu'en période hivernale plus rigoureuse que celle du scénario conventionnel. Des scénarios d'usager simulés dans le bâtiment par ses actions sur la gestion de volets, la température de consigne intérieure et la consommation d'ECS sont appliqués au bâtiment pour évaluer l'impact du comportement de l'usager sur le comportement énergétique du bâtiment.

Un bilan annuel de la qualité d'air a été effectué par la mesure du taux de CO₂, l'humidité et la température de l'air intérieur pour évaluer le confort de l'occupant.

Le bilan énergétique du bâtiment du fait de la consommation de ses équipements (VMC, PAC, ballon ECS, prises, éclairage, etc.) et sa production propre (panneaux solaires photovoltaïques et thermique) est présenté sur l'année 2020. Le ballon d'ECS est l'élément le plus consommateur d'énergie (32%) suivi par la PAC (28%) et le KIT (19%). La VMC, les prises et les autres équipements se partagent équitablement le reste de la consommation énergétique du bâtiment à 7%. 66% de sa consommation est couverte par la production des panneaux photovoltaïques dont 40% est autoconsommé.

Les comportements énergétiques des systèmes installés dans le bâtiment (VMC, PV, ballon ECS) sont évalués à partir de l'analyse des mesures acquises par l'instrumentation.

Des mesures de rayonnements solaires par la station météo de l'IUT sur un plan horizontal ont été déduits les rayonnements mensuels reçus par les capteurs du bâtiment selon leur inclinaisons et leur orientations. De leur production effective d'énergie électrique, le rendement des panneaux solaires a été évalué mensuellement entre 9% et 10,4% et annuellement à 9,8% pour l'année 2020.

L'analyse énergétique du ballon d'ECS a montré que les pertes du ballon contribuent à 55% de l'énergie qu'il a reçue. Le panneau solaire thermique a couvert à 54% l'énergie transmise au ballon sur l'année 2020. La constante de refroidissement a été évaluée expérimentalement à la valeur de 0,176 Wh/(l.j.K) soit 37% de plus que celle donnée par le constructeur. L'analyse du fonctionnement de la résistance électrique du ballon a mis en évidence des déclenchements intempestifs contribuant à une surconsommation électrique du ballon. Des modifications de l'isolation de l'équipement extérieur du ballon permettront d'évaluer le nouveau comportement énergétique de ce système.

La mesure de température d'air des quatre conduits de la VMC a permis d'évaluer l'efficacité de l'échangeur tout au long de l'année. L'efficacité annuelle de l'échangeur est de 46% en mode double flux. Néanmoins, l'énergie échangée par la VMC DF en mode double flux contribue largement en chauffage en compensant sa consommation énergétique avec un ratio d'efficacité moyen hivernal (janvier à mars et novembre décembre) de 2,8. Le mode by-pass de la VMC s'active automatiquement pour limiter la surchauffe du bâtiment. Ce mode s'est activé à 64% du temps de mai à septembre inclus (rafraîchissement) pour évacuer 1,2 fois plus d'énergie que la VMC n'en a consommée.

Les consommations énergétiques pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment ont été mesurées expérimentalement et présentées selon la rigueur climatique estivale et hivernale et selon les 43 scénarios de comportement de l'utilisateur. La consommation énergétique de la pompe à chaleur en mode rafraîchissement est 2,4 fois plus grande que celle en mode chauffage.

En hiver, les consommations énergétiques en relation linéaire avec la rigueur climatique ont permis d'évaluer la caractéristique déperditrice du bâtiment par l'enveloppe et le renouvellement d'air à 33 W/K ainsi que les apports internes à 32 kWh par semaine.

En été, la pompe à chaleur fonctionne sur de longues durées pendant la journée permettant la circulation de l'eau du plancher rafraîchissant (à environ 10 °C) pour absorber les apports internes et externes du bâtiment et de façon qu'il atteigne ou conserve la température intérieure visée par la consigne (26 °C). La consommation énergétique du bâtiment avec la rigueur climatique définit une caractéristique déperditrice de 166 W/K du bâtiment par l'enveloppe, le renouvellement d'air et un niveau d'apport interne évalué à 28 kWh/semaine. Les fortes consommations de la PAC en période estivale comparées à celle de la période hivernale se justifient par des forts apports internes qui réduisent les consommations d'hiver et augmentent les consommations d'été. Le plancher chauffant/rafraîchissant se définit également par une efficacité d'échange thermique supérieure en hiver qu'en été.

Les différents scénarios du comportement de l'occupant sont apparus avec un effet peu significatif sur le comportement énergétique du bâtiment : la météo extérieure et les apports internes constituent les principaux facteurs impactant la consommation de la pompe à chaleur tant en été qu'en hiver.

CHAPITRE 5 : MODELISATION NUMERIQUE ET ANALYSE DES ECONOMIES D'ENERGIE

| | |
|--|-----|
| 1. Introduction | 133 |
| 2. Modélisation thermique du bâtiment..... | 133 |
| 2.1. Outils de simulation dynamique..... | 133 |
| 2.2. Principe de la simulation thermique dynamique (STD) | 134 |
| 2.3. Construction du modèle numérique..... | 135 |
| 2.4. Le modèle météorologique..... | 136 |
| 2.5. Les scénarios d'utilisateur..... | 137 |
| 3. Analyse énergétique | 137 |
| 3.1. Panneaux solaires photovoltaïques..... | 138 |
| 3.2. Ballon ECS électro-solaire | 138 |
| 3.3. Ventilation Mécanique Contrôlée Double Flux..... | 139 |
| 3.4. Impact du comportement de l'utilisateur | 140 |
| 4. Comparaisons entre scénarios réels et conventionnels..... | 143 |
| 5. Conclusion..... | 145 |

1. Introduction

Ce chapitre présente l'analyse des consommations d'énergies dans le bâtiment à l'aide d'une modélisation numérique du bâtiment, du scénario météorologique et du scénario comportemental de l'utilisateur. Le logiciel de simulation thermique Pleiades est utilisé dans cette analyse.

Une modélisation du bâtiment est effectuée compte tenu de la géométrie du bâtiment, des caractéristiques thermo-physique des matériaux des parois et des équipements énergétiques. Nous appliquerons pour comparaison les scénarios de la météo réelle et de la météo conventionnelle de la RT 2012. Les scénarios du comportement de l'utilisateur sur le bâtiment seront également comparés aux scénarios conventionnels de la RT 2012 pour en peser les impacts sur la consommation énergétique du bâtiment.

2. Modélisation thermique du bâtiment

La modélisation du comportement thermique dynamique des bâtiments repose d'abord sur une description physique appropriée des transferts de chaleur entre les différents éléments du bâtiment. Parmi les nombreux objectifs de cette démarche, on cherche notamment à évaluer les consommations de chauffage et/ou de refroidissement et du système d'ECS du bâtiment.

Cette section présente le logiciel Pleiades ainsi que le principe de la simulation thermique dynamique. Ensuite, la modélisation numérique du bâtiment expérimental est développée en tenant compte de son environnement et en détaillant les matériaux constructifs des parois. Enfin, elle présente les scénarios de la météo et du comportement de l'utilisateur utilisés dans l'étude afin d'évaluer l'impact de ces deux facteurs sur le comportement énergétique du bâtiment.

2.1. Outils de simulation dynamique

À la fin des années 1980, il existait des outils pour étudier la performance thermique des bâtiments : des méthodes simplifiées (similaires au rapport mensuel de la réglementation thermique de 1988) et d'outils détaillés (TRNSYS, DOE2, ESP, etc.) utilisés par les professionnels car trop chers en termes d'investissement et de temps d'apprentissage. C'est dans ce contexte que Pleiades a été déployé grâce à la technologie de simplification des modèles développés par le Centre de l'Énergie [73]. Peuportier [74] a réalisé un certain nombre de développements et de validations aboutissant en 1990 à l'apparition du logiciel d'optimisation de la conception des bâtiments COMFIE pour Calcul d'Ouvrages Multizones Fixé à une Interface Experte, destiné aux professionnels du bâtiment (principalement les architectes et les bureaux d'études) [75]. Cet outil a par la suite subi des améliorations constantes ainsi que d'autres processus de validations numériques et expérimentales [76], et tend encore aujourd'hui à évoluer. Il a notamment pris une forme modulaire grâce à l'utilisation du langage objet, ce qui a permis l'intégration de modules concernant notamment les énergies renouvelables [77], [78]. D'autres outils, chaînés les uns aux autres dans une volonté de conception intégrée ont vu le jour en termes de modélisation graphique (anciennement ALCYONE), d'interface graphiques pour COMFIE (PLEIADES) [79], d'Analyse de Cycle de Vie des bâtiments [80], [81] (ACV, EQUER) et des quartiers [82] (ACV, anciennement NovaEQUER).

Concernant l'impact des occupants sur le comportement énergétique des bâtiments, VORGER et al. [82] ont intégré l'activité humaine à travers la modélisation stochastique, en travaillant à améliorer la prise en compte du comportement des occupants dans le logiciel. Ce travail consiste à générer aléatoirement des ménages et leurs équipements à partir des statistiques de l'Institut national de la statistique et de

l'économie (INSEE). À partir de la génération de ces ménages les activités et comportements de chaque occupant ont également été générés, ce qui permet d'y associer des consommations énergétiques. En réalisant plusieurs simulations, l'aspect stochastique de l'étude permet alors d'obtenir une fourchette de consommations, qui aide à s'engager dans le cadre d'un processus de Garantie de Performance Énergétique (GPE) avec un risque d'erreur réduit. En 2017, à la suite de ce projet de recherche, le logiciel Pleiades a intégré un module spécifique, nommé AMAPOLA, permettant par une approche statistique d'optimiser la conception en tenant compte des occupants, en analysant les incertitudes et la sensibilité des simulations.

Pleiades est principalement utilisé par les bureaux d'études et aux éco-concepteurs de bâtiments désirant optimiser l'enveloppe du bâtiment et sa conception bioclimatique en phase amont d'un projet. Il permet de calculer la température de chaque zone thermique modélisée avec un pas de temps, d'évaluer les besoins annuels de chauffage et de refroidissement, ainsi que la consommation électrique et la puissance dissipée par certains équipements. Le développement du logiciel assuré par la société IZUBA énergies. L'émergence de tels outils basés sur des modèles réduits tient à un certain pragmatisme. Les professionnels à qui sont destinés les outils n'ont majoritairement pas le temps suffisant pour utiliser des outils plus élaborés (e.g. TRNSYS, ESP-r ou EnergyPlus) mais considèrent souvent les modèles simplifiés comme insuffisants lors d'une démarche de conception d'un projet. C'est dans un compromis intransigeant entre ces deux visions, que se placent résolument les modèles développés par le centre.

2.2. Principe de la simulation thermique dynamique (STD)

La modélisation thermique dynamique se justifie par un simple constat : le comportement d'un bâtiment avec une consommation de 200 kWh/m².an de besoin de chauffage n'est pas comme un bâtiment basse consommation (30-50 kWh/m²). Certains aspects, autrefois négligeables, comme les ponts thermiques, les apports internes ou l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, deviennent de première importance par la réduction des déperditions des bâtiments. L'intérêt de la STD se situe dans l'étude et la quantification de ses impacts dans les bâtiments neufs et en rénovation en faisant varier les solutions techniques (parois, menuiseries, équipements...).

Le principe de calcul du logiciel Pleiades consiste à étudier sur une année entière (ou une période plus courte : au plus chaud/froid) au pas de temps d'1/2 heure, le comportement thermique du bâtiment en prenant en compte seulement l'enveloppe ou en y intégrant différents systèmes tels que la ventilation, le chauffage, l'éclairage... Dans cette étude, le bâtiment est étudié pour l'année 2020.

Le logiciel prend en compte tous les paramètres impliqués dans le bilan thermique, tout en s'appuyant sur les paramètres géographiques et météorologiques du site d'implantation. Un découpage en zones thermiquement équivalentes (utilisation, apports, volume...) permet l'obtention de résultats plus ou moins explicites suivant la géométrie du sujet d'étude.

2.3. Construction du modèle numérique

Un modèle de bâtiment dans Pleiades est utilisé avec prise en compte de son environnement incluant les masques dus aux arbres et bâtiments adjacents (figure 5-1 et figure 5-2).



Figure 5-1. Visualisation 3D du bâtiment dans son environnement

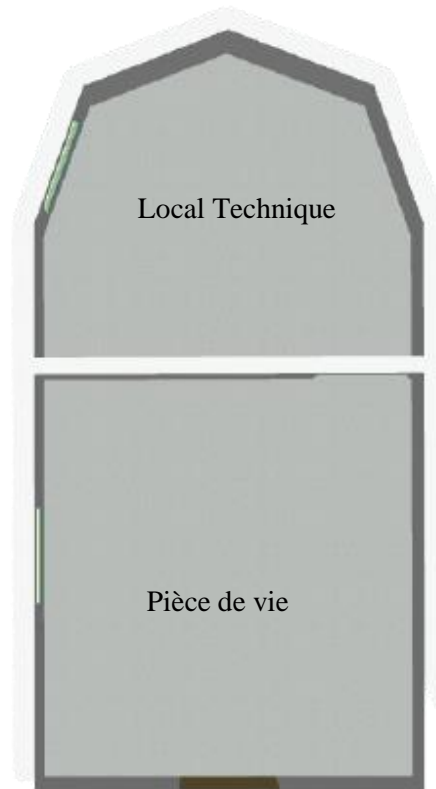


Figure 5-2. Vue en plan

Les caractéristiques thermiques des matériaux constructifs des parois ont été définies par des valeurs standards :

| Composition | Matériau | Epaisseur (cm) | Résistance Thermique (m ² .K.W-1) | | Conductivité W/(m.K) | Masse volumique (kg/m ³) |
|---------------------------------|---------------------|----------------|--|------|----------------------|--------------------------------------|
| Paroi extérieure | OSB | 1 | 0,08 | 4,13 | 0,13 | 650 |
| | Le métisse® | 15 | 3,85 | | 0,039 | 20 |
| | Lame d'air | 1,5 | 0,16 | | 0,094 | 1 |
| | Plaque de plâtre | 1,3 | 0,04 | | 0,35 | 1000 |
| Paroi intérieure | Plaque de plâtre | 1,3 | 0,04 | 2,64 | 0,35 | 1000 |
| | Le métisse® | 10 | 2,56 | | 0,039 | 20 |
| | Plaque de plâtre | 1,3 | 0,04 | | 0,35 | 1000 |
| Planchers intermédiaires | Le métisse® | 20 | 5,14 | 5,17 | 0,039 | 20 |
| | Plaque de plâtre | 1,3 | 0,04 | | 0,35 | 1000 |
| Plancher bas | Béton | 10 | 0,06 | 0,37 | 1,75 | 2450 |
| | Polystyrène expansé | 2 | 0,26 | | 0,039 | 25 |
| | Mortier | 5 | 0,04 | | 1,15 | 625 |
| | Carrelage | 2 | 0,01 | | 1,7 | 2300 |

Tableau 5-1. Compositions des parois du bâtiment

Les systèmes énergétiques ont été intégrés dans la modélisation en définissant chaque système et ses caractéristiques :

- PAC : GENIA AIR 6,
- Système solaire : Ballon et capteur SAUNIER DUVAL,
- Système photovoltaïque : deux panneaux à 15° et quatre panneaux à 45°
- Ventilation : VMC DF DOMEQ

2.4. Le modèle météorologique

Nous avons précisé dans le deuxième chapitre que nous utilisons les données de la station météorologique de Nîmes – Courbessac définies au pas horaire de l'année 2020 qui sont corrélées et plus complètes que celles de notre station météo.

Deux scénarios météorologiques sont utilisés dans l'étude :

- Les scénarios réels : issus des données réelles de la station météo Courbessac (Météo France),

- Les scénarios RT : issus de la réglementation avec l'utilisation des données météorologiques réglementaires de la zone H3 (Nice).

2.5. Les scénarios d'utilisateur

Nous appelons scénarios d'usage l'ensemble des éléments qui permettent de définir la présence et les actions des occupants au sein d'un logement, à savoir : l'occupation, la consigne de température, les apports internes, la gestion des volets et celle des fenêtres. Les scénarios d'utilisateur sont définis au pas de temps horaire sur toute l'année et peuvent être importés dans la bibliothèque de Pleiades à partir d'un fichier texte. Nous définissons ainsi deux familles de scénarios de comportement de l'utilisateur :

- Les scénarios comportementaux : définis grâce à notre modèle comportemental qui est développé dans la suite de l'étude (paragraphe 3. du chapitre 4).
- Le scénario RT : issu de la réglementation pour un usage en maison individuelle.

3. Analyse énergétique

La simulation avec les scénarios réels et la météo réelle a été réalisée sur Pleiades, l'objectif étant d'évaluer les consommations énergétiques de chauffage, rafraîchissement, ECS et ventilation et de comparer les comportements énergétiques de ces systèmes avec ceux observés in-situ.

L'estimation des déperditions thermiques du bâtiment par ses parois, ses menuiseries et les ponts thermiques est effectuée après sa modélisation.

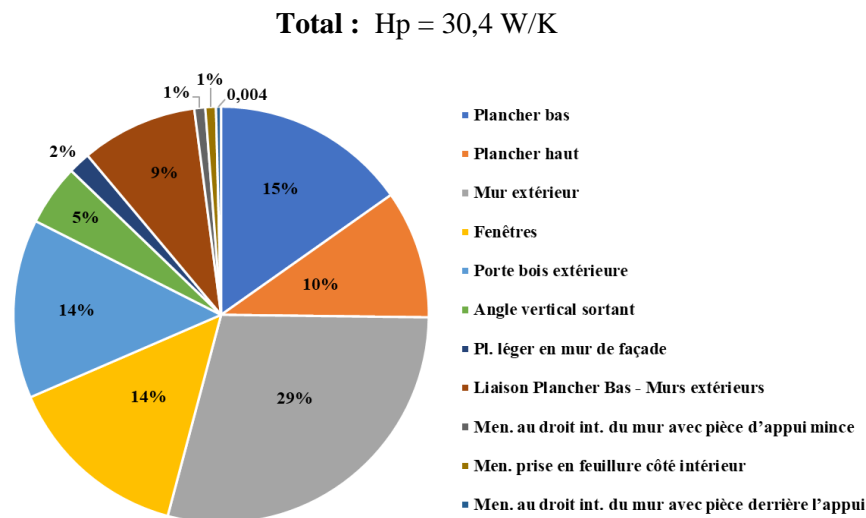


Figure 5-3. Répartition des déperditions statiques du bâtiment par élément de l'enveloppe

La plus grande déperdition dans le bâtiment s'effectue par les murs extérieurs (29%), suivie par le plancher bas (15%), les fenêtres et la porte (14% chacun), le plancher haut (10%) et les ponts thermiques (20%).

Le coefficient déperditif statique et dynamique du bâtiment s'évalue par :

$$H = H_p + H_v = 30,4 + 0,34 \cdot Q_v \cdot (1 - \varepsilon) = 31,2 \text{ W/K}$$

Avec : $Q_v = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ et $\varepsilon = 0,92$ (efficacité donnée par le constructeur)

Cette valeur est à comparer avec celle que nous avons trouvée dans l'analyse du comportement énergétique du bâtiment en mode chauffage in-situ (33 W/K).

Dans les paragraphes suivants, une analyse énergétique détaillée de chaque système est présentée à partir des résultats fournis par l'outil Pleiades.

3.1. Panneaux solaires photovoltaïques

Une très forte similitude entre simulation et mesures réelles est observée pour la production électrique mensuelle d'origine photovoltaïque.

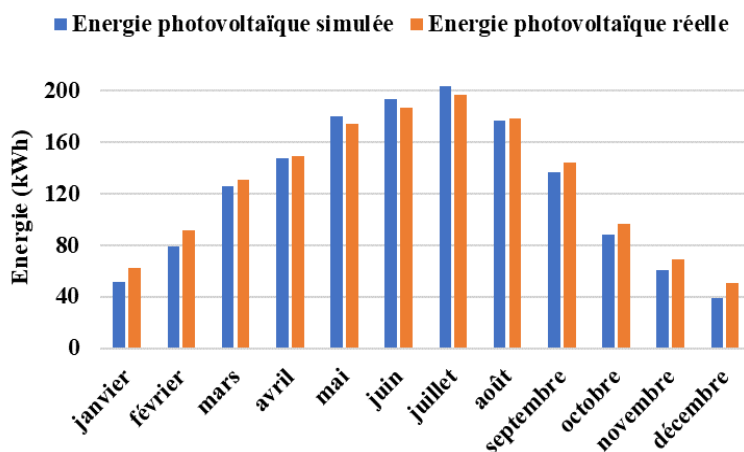


Figure 5-4. Production électrique photovoltaïque mensuelles simulée et réelle

3.2. Ballon ECS électro-solaire

Les consommations énergétiques du ballon ont été simulées avec la constante de refroidissement évaluée in-situ (0,176 Wh/(l.K.j)), les scénarios réels (décrits dans le paragraphe 3. du chapitre 4) et la météo réelle du lieu. Ces consommations sont présentées mensuellement sur la figure 5-5 :

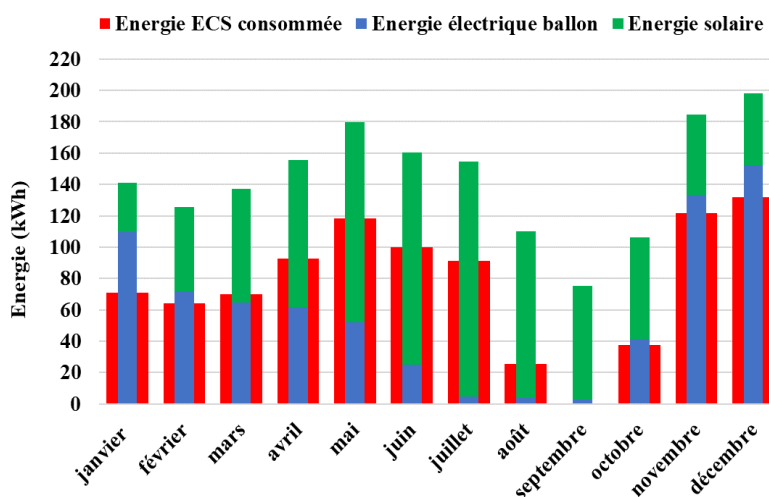


Figure 5-5. Bilans mensuels simulés du ballon ECS

La consommation électrique annuelle du ballon de 736 kWh est un peu moins élevée que celle observée in-situ 745 kWh, avec une consommation d'ECS pourtant supérieure à celle in-situ (analyse des

volumes d'eau chaude consommée). Ceci s'explique par les mises en fonctionnement intempestives de la résistance électrique déjà évoquées.

Les apports solaires transmis au ballon par le capteur sont très voisins de ceux observés in-situ avec un écart de 6% sur l'année 2020 (par comparaison des figure 4-26 et figure 5-5).

L'observation de l'évolution annuelle de la température d'eau au milieu du ballon (fournie par Pleiades) est à rapprocher de celle mesurée expérimentalement (figure 4-24). Les écarts constatés peuvent être expliqués par la mise en route de la résistance électrique mais également par une température du réseau d'eau froide de la simulation différente de celle in-situ.

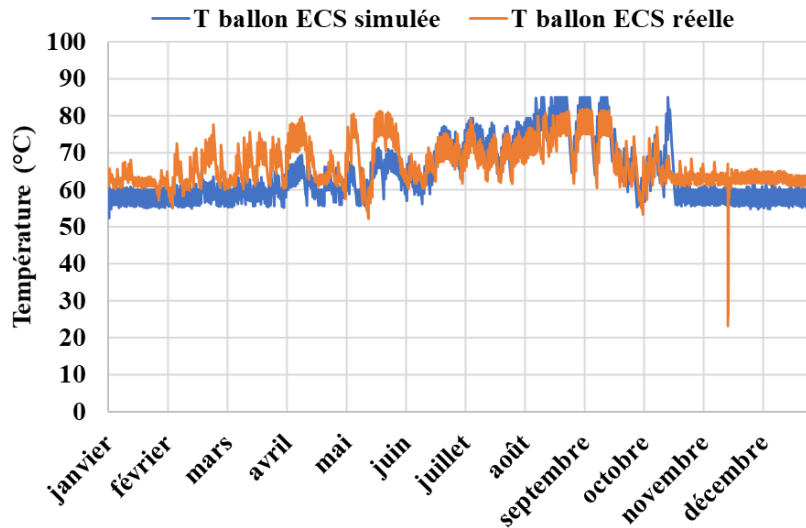


Figure 5-6. Évolution de la température d'eau simulée au milieu du ballon ECS

3.3. Ventilation Mécanique Contrôlée Double Flux

L'efficacité de la VMC est donnée au pas horaire par l'outil STD Pleiades. Cette efficacité s'annule en mode by-pass (pas d'échange thermique entre flux) et le débit d'air reste inchangé (contrairement au fonctionnement réel de la VMC DF installée). Les pourcentages de fonctionnement de la VMC en mode by-pass obtenus avec l'outil STD sont comparés, figure 5-7, avec ceux obtenus in-situ :

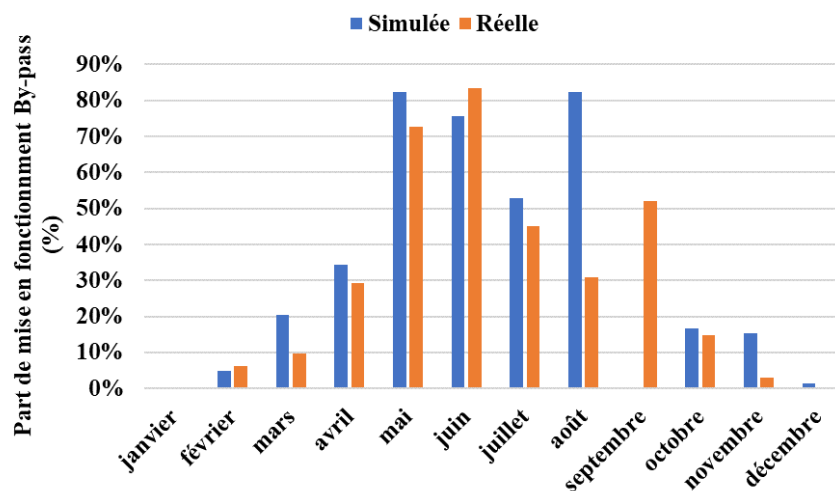


Figure 5-7. Pourcentages mensuels de mise en fonctionnement du mode by-pass de la VMC simulés et réels pour les scénarios comportementaux et météorologiques réels pour l'année 2020

Hormis au mois d'août et septembre, une forte similitude de fonctionnement de la VMC est observée. Les scénarios réels du bâtiment expérimental (d'utilisateur et météorologique) ont été importés dans l'outil Pleiades en but de comparaison avec les mesures in-situ. Une forte similitude est observée pour le comportement énergétique des panneaux photovoltaïques. Le ballon d'ECS électro-solaire est le poste le plus consommateur d'énergie in-situ et en simulation avec les scénarios réels : les résultats obtenus sont voisins car les apports énergétiques du capteur sont proches et la constante de refroidissement du ballon a été ajustée à celle mesurée in-situ ($C_r = 0,176 \text{ Wh}/(l.j.K)$).

Le fonctionnement annuel du mode by-pass de la VMC DF de la simulation est très similaire à celui obtenu en réalité, cependant l'outil numérique nécessite une efficacité constante caractérisant l'échangeur tandis que les mesures ont montré une efficacité fortement variable au cours de l'année étudiée. On constate l'intérêt majeur en hiver et en été des deux modes de fonctionnement de la VMC : en hiver, l'énergie récupérée par l'échangeur double flux compense sa consommation énergétique d'un facteur 2,9 à 3,7 selon le mois. En été, le mode by-pass de la VMC limite la surchauffe dans le bâtiment en évacuant une énergie supérieure à celle nécessaire à son fonctionnement.

3.4. Impact du comportement de l'utilisateur

Les 43 scénarios réels, associés à la météo réelle, ont été importés dans l'outil Pleiades pour la caractérisation annuelle du bâtiment.

L'énergie fournie par la pompe à chaleur est évaluée à partir du comportement thermique du bâtiment (enveloppe et ventilation) et de la climatologie. Des caractéristiques constructeur de la pompe à chaleur, l'énergie consommée est déduite.

La figure 5-8 présente l'énergie journalière fournie au bâtiment en modes chauffage et rafraîchissement.

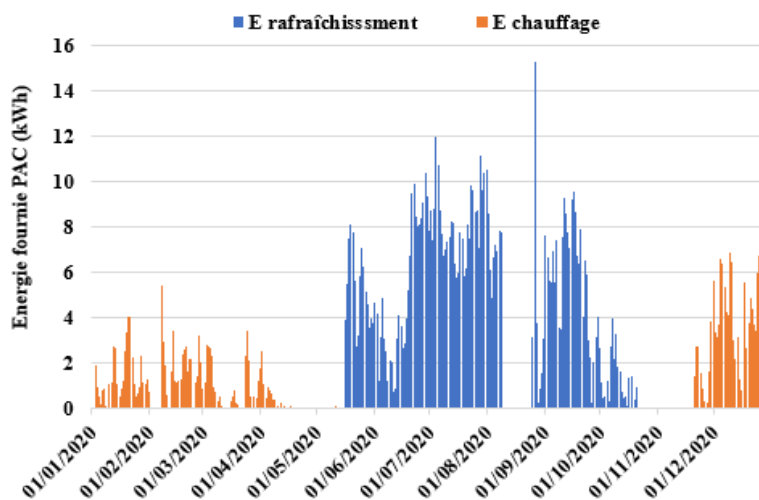


Figure 5-8. Énergie journalière simulée fournie en 2020 (scénarios et météo réels)

L'énergie électrique consommée par la PAC est calculée à partir du besoin et des coefficients de performance en mode chaud (4,2) et froid (2,91) définis par le constructeur comme données d'entrée du logiciel.

On observe que l'énergie totale simulée de la PAC apparaît plus importante en mode rafraîchissement qu'en mode chauffage. C'est un résultat que l'on retrouve couramment qui conforte la nécessité de se pencher sur le comportement énergétique du bâtiment en été.

Le tableau des scénarios du comportement d'utilisateur agissant sur la température de consigne et la position journalière des volets est rappelé ci-dessous :

| Scénario | Jour 1 | Jour 7 | Température de consigne | Position volets |
|----------|------------|------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 01/01/2020 | 07/01/2020 | 18 °C | ouvert |
| 2 | 10/01/2020 | 16/01/2020 | | fermé |
| 3 | 17/01/2020 | 23/01/2020 | | fermé |
| 4 | 25/01/2020 | 31/01/2020 | | mi-ouvert |
| 5 | 17/02/2020 | 23/02/2020 | 21 °C | fermé |
| 6 | 26/02/2020 | 03/03/2020 | | ouvert |
| 7 | 04/03/2020 | 10/03/2020 | | ouvert |
| 8 | 11/03/2020 | 17/03/2020 | | ouvert |
| 9 | 18/03/2020 | 24/03/2020 | | ouvert |
| 10 | 25/03/2020 | 31/03/2020 | | ouvert |
| 11 | 01/04/2020 | 07/04/2020 | | fermé |
| 12 | 08/04/2020 | 14/04/2020 | | fermé |
| 13 | 15/04/2020 | 21/04/2020 | | fermé |
| 14 | 22/04/2020 | 28/04/2020 | | fermé |
| 15 | 01/05/2020 | 07/05/2020 | ouvert | |
| 16 | 08/05/2020 | 14/05/2020 | ouvert | |
| 17 | 17/05/2020 | 23/05/2020 | 26 °C | ouvert |
| 18 | 24/05/2020 | 30/05/2020 | | ouvert |
| 19 | 31/05/2020 | 06/06/2020 | | ouvert |
| 20 | 12/06/2020 | 18/06/2020 | | fermé |
| 21 | 22/06/2020 | 28/06/2020 | | ouvert |
| 22 | 29/06/2020 | 05/07/2020 | | ouvert |
| 23 | 08/07/2020 | 14/07/2020 | | fermé |
| 24 | 22/07/2020 | 28/07/2020 | | mi-ouvert |
| 25 | 02/08/2020 | 08/08/2020 | | fermé |
| 26 | 10/08/2020 | 16/08/2020 | | fermé |
| 27 | 17/08/2020 | 23/08/2020 | fermé | |
| 28 | 26/08/2020 | 01/09/2020 | fermé | |
| 29 | 02/09/2020 | 08/09/2020 | 24 °C | fermé |
| 30 | 09/09/2020 | 15/09/2020 | | fermé |
| 31 | 16/09/2020 | 22/09/2020 | | ouvert |
| 32 | 23/09/2020 | 29/09/2020 | | ouvert |
| 33 | 30/09/2020 | 06/10/2020 | | ouvert |
| 34 | 07/10/2020 | 13/10/2020 | | ouvert |
| 35 | 14/10/2020 | 20/10/2020 | | ouvert |
| 36 | 21/10/2020 | 27/10/2020 | | ouvert |
| 37 | 28/10/2020 | 03/11/2020 | | ouvert |
| 38 | 04/11/2020 | 10/11/2020 | | ouvert |
| 39 | 11/11/2020 | 17/11/2020 | ouvert | |
| 40 | 20/11/2020 | 26/11/2020 | 20 °C | ouvert |
| 41 | 27/11/2020 | 03/12/2020 | | ouvert |
| 42 | 04/12/2020 | 10/12/2020 | | ouvert |
| 43 | 11/12/2020 | 17/12/2020 | | ouvert |

Tableau 5-2. Scénarios du comportement de l'utilisateur simulé

Parmi ces 43 scénarios hebdomadaires de l'année 2020 étudiée, nous nous intéressons particulièrement aux 26 scénarios analysés expérimentalement dans le paragraphe 6.4.2. du chapitre 4. Les relevés des

énergies fournies par la PAC au pas horaire ou journalier, nous permettent une évaluation hebdomadaire du fonctionnement de la PAC selon les scénarios de l'utilisateur et de la météo.

En mode chauffage, les 12 scénarios sont présentés en fonction des DH_{heb} de la semaine étudiée sur la figure 5-9.

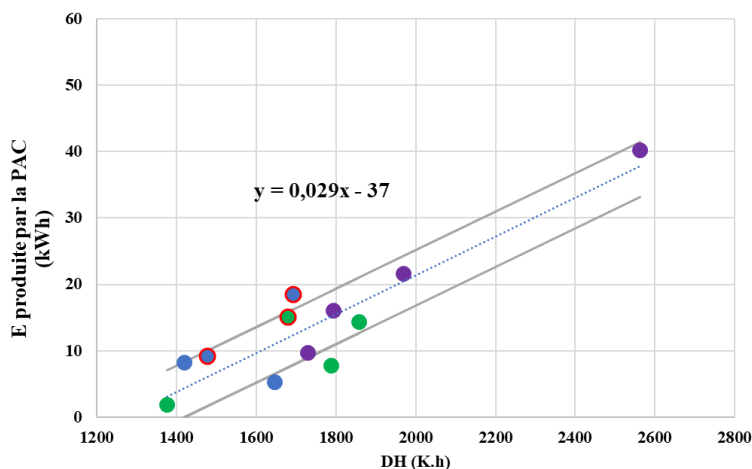


Figure 5-9. Énergie hebdomadaire produite par la PAC selon la rigueur climatique pour chacun des scénarios d'hiver (simulation Pleiades)

Les points cerclés en rouge caractérisant un comportement contreproductif de l'occupant (volets fermés en journée) apparaissent par l'outil de simulation Pleiades comme plus énergivores que ceux caractérisant le comportement expert de l'occupant (volets ouverts en journée), d'une manière plus marquée que par nos mesures expérimentales. L'économie potentielle d'énergie avec un comportement expert s'évalue donc de 5 à 10 kWh par semaine selon la rigueur climatique et la consigne de température.

En mode rafraîchissement, les points cerclés en rouge de la figure 5-10 caractérisant un comportement contreproductif de l'occupant (volets ouverts en journée) se positionnent presque tous (5 parmi 7) au-dessus de la courbe de tendance moyenne.

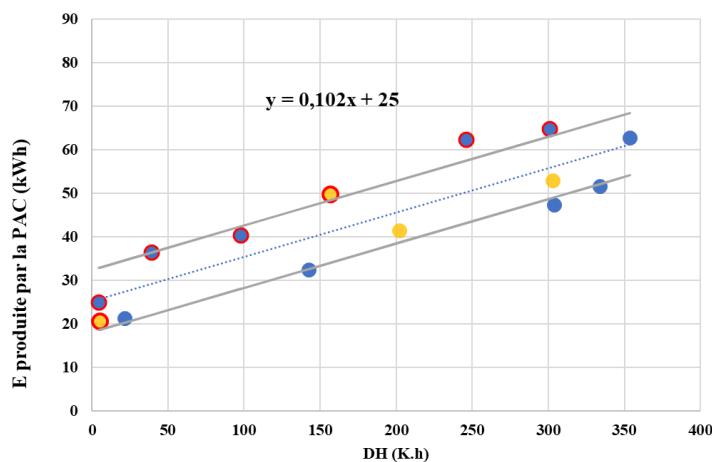


Figure 5-10. Énergie hebdomadaire produite par la PAC selon la rigueur climatique pour chacun des scénarios d'été (simulation Pleiades)

Les points caractéristiques du comportement expert de l'occupant se situent presque tous (6 parmi 7) en dessous de la courbe de tendance moyenne. La simulation montre qu'environ 20 kWh d'énergie par

semaine peuvent être économisés par un comportement adapté de l'occupant sur la gestion des volets en été.

L'impact de l'occupant sur la production de la PAC par la gestion de la consigne de la température intérieure est fortement lié à la rigueur climatique hebdomadaire qui varie de 1400 à 2600 K.h en hiver et de 0 à 350 K.h en été.

La simulation STD montre un comportement du bâtiment en chauffage et en rafraîchissement similaire à celui identifié in-situ. En hiver, on obtient un coefficient de déperdition de 29 W/K voisin de 33 W/K in-situ. Les apports internes hebdomadaires obtenus par la simulation (37 kWh/semaine) sont également voisins de ceux évalués expérimentalement (32 kWh/semaine). En été, la dépense énergétique du bâtiment avec la climatologie est plus forte qu'en hiver du fait du rayonnement solaire impactant l'enveloppe du bâtiment. La valeur déperditive du bâtiment en été évaluée expérimentalement à 160 W/K et numériquement à 102 W/K peut être influencé par plusieurs facteurs (perméabilité à l'air du bâtiment, ventilation naturelle des combles, albédo, échange sol-plancher, etc.). Les apports internes à combattre l'été sont de 25 kWh/semaine en simulation et 28 kWh/semaine in-situ.

4. Comparaisons entre scénarios réels et conventionnels

Quatre simulations thermiques sont effectuées sur l'année 2020 dans les conditions météorologiques (RT 2012 et météo réelle 2020) en affectant différents scénarios de l'occupant (RT et réel). Nous considérons aussi que la ventilation mécanique contrôlée est en fonctionnement permanent. Dans le tableau 5-2, nous présentons les résultats obtenus par Pleiades pour les quatre simulations :

| | Scénarios et météo RT 2012 (kWh) | Scénarios réels - Météo RT 2012 (kWh) | Scénarios RT 2012 - Météo réelle (kWh) | Scénarios et météo réels (kWh) | Mesures réelles (kWh) |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|-----------------------|
| Simulation | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Chauffage | 233 | 182 | 268 | 209 | 189 |
| Refroidissement | 91 | 260 | 139 | 291 | 454 |
| ECS | 561 | 689 | 615 | 736 | 745 |
| Auxiliaires de ventilation | 130 | 130 | 130 | 130 | 155 |
| Auxiliaires de distribution | 128 | 215 | 166 | 210 | 434 |
| Production PV | 1622 | 1622 | 1493 | 1493 | 1632 |
| TOTAL (hors production PV) | 1143 | 1476 | 1318 | 1576 | 1977 |

Tableau 5-3. Résultats des quatre simulations issus de l'outil Pleiades et mesures réelles par poste

Les comparaisons des simulations (1) et (2) puis (3) et (4) permettent d'évaluer l'impact de l'occupant sur les consommations énergétiques pour une météorologie donnée (réglementaire ou réelle) tandis que la comparaison des simulations (1) et (3) puis (2) et (4) permet d'évaluer l'impact de la météorologie

pour les scénarios d'usage réels ou ceux de la RT 2020 sur les consommations énergétiques des systèmes du bâtiment.

En mode chauffage, on constate que la consommation de la PAC pour les simulations (2) et (4) est plus faible que celle des simulations (1) et (3) du fait d'une consigne de température intérieure en janvier à 18 °C pour les scénarios réels, plus faible que celle de la RT 2012 fixée à 19 °C en mode occupation.

En mode rafraîchissement, les consommations des scénarios réels sont plus importantes du fait de la température de consigne fixée à 26 °C plus faible à celle de la RT fixée à 28 °C en mode occupation.

En période de chauffage, la météo impacte plus fortement la consommation du bâtiment que le comportement de l'utilisateur, tandis qu'en période de refroidissement c'est l'inverse. Ceci confirme l'intérêt de mieux prendre en compte le comportement de l'utilisateur en été dans le cas d'un bâtiment climatisé.

Les consommations d'ECS en scénarios RT sont plus faibles que celles de scénarios réels du fait de puisage d'eau chaude réduit.

Pour les auxiliaires de distribution, l'énergie consommée mesurée dans le bâtiment est plus importante que celle des simulations car le module hydraulique (KIT) n'est pas asservi à la température intérieure et fonctionne en permanence. Ceci est un point d'amélioration du bâtiment expérimental à entreprendre pour réduire significativement les consommations énergétiques globales du bâtiment.

Enfin les quatre simulations STD ont des consommations plus petites que celles mesurées in-situ. Ce qui montre l'écart entre les outils numériques et la réalité du fait de la météorologie, du comportement de l'occupant, des efficacités des systèmes énergétiques et des situations accidentelles exceptionnelles.

L'écart relatif des consommations réelles totales du bâtiment avec celles de la simulation intégrant les scénarios réels est de 20% (et 42% à la simulation RT). Cet écart peut avoir plusieurs causes : le fonctionnement permanent de système de distribution, les efficacités réelles des systèmes (PAC et VMC) et l'échange thermique plancher-sol-puits thermique.

L'analyse comparée des consommations globales du bâtiment des simulations (1) à (4), nous permet des observations sur l'impact de la météo et du comportement de l'utilisateur :

- L'augmentation de la consommation globale du bâtiment entre la simulation RT conventionnelle et la simulation incluant des comportements réels et une météo réelle est de 27%.
- L'impact du passage de la météo conventionnelle à la météo réelle représente une augmentation de 13% avec le comportement conventionnel de l'utilisateur et 6% avec le comportement réel. Ces variations sont simultanément dues aux augmentations des consommations de chauffage, de rafraîchissement et d'ECS.
- Les simulations montrent une augmentation de 23% des consommations énergétiques globales en passant du comportement conventionnel de l'utilisateur au comportement réel étudié pour la météo conventionnelle et une augmentation de 17% dans le cas de l'utilisation de la météo réelle. Le comportement de l'utilisateur réduit faiblement les consommations de chauffage (basse consigne de température en janvier) mais accroît fortement les consommations de rafraîchissement et d'ECS.

5. Conclusion

La Simulation Thermique Dynamique (STD), consiste à évaluer les consommations énergétiques du bâtiment sur une année complète selon de nombreux paramètres et caractéristiques (enveloppe, météorologie du lieu, exposition, apports internes, comportement de l'utilisateur, etc.).

Dans cette étude, différentes simulations ont été entreprises pour le bâtiment expérimental de l'IUT de Nîmes pour peser l'impact du comportement de l'utilisateur et de la météorologie sur le comportement énergétique du bâtiment. Les résultats montrent que les scénarios RT (météo et comportement de l'utilisateur) sous-évaluent la consommation énergétique totale annuelle de 20% du fait du comportement de l'occupant et d'environ 10% du fait de la météorologie.

L'impact de l'occupant par la gestion des volets sur la consommation de la pompe à chaleur est marqué en hiver et été par les deux comportements types de l'individu (expert et contreproductif). En hiver, l'économie énergétique potentielle due au comportement expert est de l'ordre de 10 kWh par semaine et 20 kWh en été pour ce bâtiment avec sa surface vitrée orientée sud.

Ces précédents résultats sont relatifs à une surface habitable de 17,1 m² et peuvent être étendus à une surface habitable de 100 m² avec une surface de baies en proportion et exposée au rayonnement solaire. En considérant des durées de chauffage et de rafraîchissement de 3 mois, soit 12 semaines, on peut donc évaluer les variations de la facture énergétique en chauffage et rafraîchissement pour une telle surface habitable entre un comportement expert et comportement contreproductif. Ces variations s'évaluent donc à environ 700 kWh/an en période chauffage et 1400 kWh/an en période rafraîchissement. Ces impacts de consommations sont bien-sûr non négligeables sur la facture énergétique car ils sont de l'ordre de l'énergie à fournir annuellement au ballon d'ECS.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

Le secteur du bâtiment est le premier secteur consommateur de l'énergie totale en France. Le chauffage/rafraîchissement et l'eau chaude sanitaire sont les deux postes qui restent majeurs malgré les évolutions des réglementations thermiques.

Des études antérieures ont mis en évidence le comportement de l'individu dans le bâtiment par ses actions sur la température intérieure de consigne et la gestion des occultations et des ouvrants. Ces deux comportements ont été simulés sur un bâtiment expérimental de l'IUT de Nîmes soumis au climat méditerranéen réputé pour ses périodes caniculaires. Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit a pour objectif d'évaluer l'impact de l'occupant sur le comportement énergétique du bâtiment et les efficacités énergétiques de chaque système installé.

Les 18 premiers mois de cette thèse étaient consacrés à installer l'ensemble des équipements du bâtiment, à les instrumenter et développer des outils pour l'acquisition des données (énergies, températures, humidité, taux de CO₂, irradiations, etc.). Ce travail nous a permis d'acquérir les données nécessaires pour analyser finement le comportement énergétique du bâtiment dans sa globalité et de chacun des systèmes sur la durée totale de l'année 2020.

La qualité de l'air intérieur est évaluée avec le taux d'humidité relative et le taux de CO₂. Les variations de la température de l'air intérieur et celle de l'air extérieur nous ont permis de quantifier les durées d'inconfort au froid et au chaud. Les inconforts au froid observés sont dus aux basses températures intérieures de consigne fixées.

Les rendements mensuels et annuels du panneau thermique et de l'installation photovoltaïque, le rapport des énergies fournies aux irradiations reçues sur les plans inclinés ont été évalués expérimentalement. Les efficacités de la VMC DF, de la pompe à chaleur et du ballon d'ECS ont été caractérisées in-situ mensuellement et annuellement : les valeurs sont toujours inférieures à celles données par les constructeurs.

Les bilans énergétiques mensuels du bâtiment montrent que le bâtiment est à énergie positive pour les mois d'avril, mai et août 2020. Le comportement énergétique du bâtiment a été analysé selon les scénarios de l'utilisateur à partir de l'énergie fournie par la PAC et selon la rigueur climatique d'hiver et d'été. Les actions contreproductives de l'occupant sur les occultations ont un impact deux fois plus élevé en été qu'en hiver sur les consommations énergétiques de la pompe à chaleur.

Le modèle établi sous Pleiades qui intègre la météorologie réelle et les scénarios réels de l'utilisateur nous a permis de comparer les résultats de l'outil de simulation thermique dynamique avec les mesures réelles. Les résultats de la STD réalisée montrent une similitude du comportement énergétique du bâtiment et des systèmes avec ceux observés in-situ : caractéristique thermique dynamique du bâtiment, apports internes, énergies fournies par les panneaux solaires photovoltaïques et thermique, occurrence

de fonctionnement en mode by-pass de la VMC DF ainsi que l'impact énergétique de l'action de l'utilisateur sur les occultations en été et en hiver.

Les simulations par l'outil STD ont montré que la météo RT sous-estime les consommations énergétiques du bâtiment en chauffage et rafraîchissement et sur-estime les productions énergétiques solaires.

Extrapolée à un bâtiment de 100², l'étude du bâtiment expérimental de 17,1 m² montre que la consommation énergétique peut varier jusqu'à 700 kWh/an en mode chauffage et 1400 kWh/an en mode rafraîchissement en fonction du comportement de l'utilisateur (expert ou contreproductif).

Les simulations STD associées aux mesures réelles ont montré aussi l'impact de l'utilisateur par ses actions sur le comportement énergétique du bâtiment. Cet impact est beaucoup plus important en période estivale qu'en hiver et sera donc très significatif en région méditerranéenne.

Perspectives

Des solutions peuvent être mises en place pour donner lieu à des économies énergétiques significatives sur la consommation totale du bâtiment.

Parmi nos principaux postes de dépenses énergétiques, l'auxiliaire de distribution et le ballon d'ECS tiennent une place importante. Pour cela, une surisolation de l'enveloppe du ballon d'ECS peut être envisagée afin de réduire l'énergie dissipée et contribuer à réduire les consommations d'été. Une température de consigne d'ECS minimale de 55 °C doit être fixée (du fait des faibles volumes de puisage journalier) afin de donner priorité à la production solaire pour réduire les consommations électriques et l'énergie dissipée.

La PAC est asservie à la température intérieure du bâtiment et l'étude a montré que l'auxiliaire de distribution (module hydraulique) doit être aussi asservi à cette température pour réduire les consommations annuelles.

La pompe à chaleur rafraîchit le bâtiment par le plancher et évite tout inconfort d'été : l'échange thermique du plancher rafraîchissant avec l'intérieur et le sol sera un point intéressant à étudier pour une meilleure compréhension du comportement thermique du plancher.

Sous le plancher du bâtiment, 84 thermocouples sont répartis dans le media du puits thermique pour évaluer les transferts thermiques entre le sol et l'air véhiculé par l'échangeur. L'étude de l'efficacité de cet échangeur doit être évaluée selon les saisons, les débits d'air véhiculé, les longueurs d'échanges et les diamètres de conduits ainsi que la configuration choisie pour le réseau d'air, pour une conception optimisée d'un tel dispositif. Cette étude sera mise en regard avec les modèles numériques développés par HOLLMULLER [83].

L'étude de transfert d'humidité par les parois est envisagée par l'installation de capteurs dédiés pour valider le fonctionnement théorique et l'intérêt de la membrane pare-vapeur Vario KM Duplex UV - Isover. Cette instrumentation permettra une analyse de transfert de masses à l'échelle du bâtiment, qui s'inscrit dans le cadre du projet Optimisation Énergétique de l'Habitat méditerranéen (OEHM) développé au sein du LMGC. Un des axes de recherche de ce projet est d'évaluer les transferts hygrothermiques d'une paroi de matériaux spécifiques (pierres, briques, etc.). La cellule bizona qui est en cours d'implantation permettra cette étude. En effet, elle est constituée de deux pièces régulées en température et humidité qui permettront d'évaluer l'influence de l'humidité sur l'échange thermo-hydrique de la paroi de séparation étudiée.

Ce dispositif couplé à l'étude des caractéristiques des matériaux permettra de caractériser la paroi dans son ensemble en incluant les joints entre les éléments. Ces caractéristiques permettront d'alimenter l'outil de calcul numérique développé par l'équipe de Work Package 2 « modélisation » du projet OEHM pour simuler finement le comportement hygrothermique dynamique du bâtiment.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Batier, “Confort thermique et énergie dans l’habitat social en milieu méditerranéen : d’un modèle comportemental de l’occupant vers des stratégies architecturales.”, Thèse de l’Université de Montpellier, p. 291, 2016.
- [2] European Commission, “The European Green Deal.”, Official Journal of the European Union Brussels. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document>, 2019.
- [3] European Commission, “A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives.” Official Journal of the European Union. Brussels. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0662>, 2020.
- [4] European Commission. Joint Research Centre, “Energy consumption and energy efficiency, trends in the EU-28 2000-2015: efficiency trends of energy related products and energy consumption in the EU 28.”, LU: Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/6684> [Accessed: 7January2021], 2018.
- [5] Eurostat, “Energy saving statistics - Statistics Explained.”, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households. [Accessed: 24 Jun. 2021], 2020.
- [6] Jules Lastennet et al., “La consommation d’énergie dans les Etats membres.”, <https://www.touteurope.eu/environnement/la-consommation-d-energie-dans-les-etats-membres/>. [Accessed: 06 Jul. 2021], 2020.
- [7] Jules Lastennet et al., “L’énergie dans l’Union européenne.”, [Toute l’Europe.eu., https://www.touteurope.eu/actualite/l-energie-dans-l-union-europeenne.html](https://www.touteurope.eu/actualite/l-energie-dans-l-union-europeenne.html). [Accessed: 21 Mar. 2021], 2021 .
- [8] Eurostat, “Energy statistics - an overview - Statistics Explained.” https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview. [Accessed: 24 Jun. 2021], 2021.
- [9] “Definition of ODEX indicators in ODYSSEE data base.”, ODYSSEE MURE, 2020, <https://www.indicators.odyssee-mure.eu/odex-indicators-database-definition.pdf>, p. 12, 2020.
- [10] Lea Gynther et al., “Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors.”, An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases, p. 97, 2015.

- [11] “Final Consumers, Energy efficiency trends of final consumers.”, ODYSSEE-MURE. <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/overview/trends-of-final-consumers.html> [Accessed: 21 Mar. 2021], 2021.
- [12] Fabian Hein et al., “The European Power Sector in 2020: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition.”, Agora Energiewende and Ember, p. 18, 2021.
- [13] Eurostat, “Renewable energy statistics - Statistics Explained.”, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics. [Accessed: 07 Jul. 2021], 2020.
- [14] N. Buckley et al., “Using urban building energy modelling (UBEM) to support the new European Union’s Green Deal: Case study of Dublin Ireland.”, *Energy and Buildings*, vol. 247, p. 111115, doi : 10.1016/j.enbuild.2021.111115, 2021.
- [15] Eurostat, “Energy consumption in households - Statistics Explained.”, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use. [Accessed: 20 Feb. 2021], 2021.
- [16] “Energy efficiency trends for households in the EU Households Energy.”, ODYSSEE-MURE. <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/>. [Accessed: 29 Jun. 2021], 2021.
- [17] S. Beck et al., “Chiffres clés de l’énergie.”, Édition 2020’, Ministère de la Transition écologique, Le service des données et études statistiques, p. 80, 2020.
- [18] C. Phan et al., “Chiffres clés des énergies renouvelables.”, Édition 2020, Ministère de la Transition écologique, Le service des données et études statistiques, p. 92, 2020.
- [19] F. Chatelain et al., “ademe-et-vous-occitanie.”, N°4 • janvier 2018. ADEME <https://occitanie.ademe.fr/sites/default/files/ademe-et-vous-occitanie-4-janvier-2018.pdf> [Accessed: 20January2021], 2018.
- [20] Direction de la communication et de l’information citoyenne, “Scénario Région à énergie positive.”, Région Occitanie/Pyrénées-Méditerranée, p. 15, 2017.
- [21] “chiffres clés énergie Occitanie,” AREC Occitanie, Région Occitanie, ADEME, Préfecture de la région Occitanie, 2021.
- [22] “L’Occitanie mise sur le solaire.”, *ladepeche.fr*. <https://www.ladepeche.fr/article/2018/06/15/2818407-l-occitanie-mise-sur-le-solaire.html>. [Accessed: 06 Jul. 2021], 2018.
- [23] “Panorama EnR de la Région Occitanie/Pyrénées-Méditerranée.”, p. 36, 2019
- [24] “Énergies renouvelables et de récupération.”, L’ADEME en Occitanie. <https://occitanie.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-et-de-recuperation>. [Accessed: 07 Jul. 2021].

-
- [25] “Règlement Thermique 2012 des bâtiments.”, Ministère de la Transition écologique. <https://www.ecologie.gouv.fr/exigences-reglementaires-construction-des-batiments-rt-2012> [Accessed: 07 Jul. 2021], 2021.
- [26] “Référentiel de labellisation des bâtiments neufs v3.1.”, Association BBCE. <https://www.batimentbas carbone.org/referentiel-technique-bbce/>. [Accessed: 29 Jun. 2021], 2021.
- [27] “Référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs - Niveaux de performance « Energie – Carbone » pour les bâtiments neufs.”, Ministère de l’environnement, de l’énergie et de la mer - Ministère du logement et de l’habitat durable, p. 14, 2016.
- [28] “Niveaux de performance - Bâtiments à Énergie Positive et Réduction Carbone.”, <http://www.batiment-energiecarbone.fr/niveaux-de-performance-a88.html> [Accessed: 07 Jul. 2021], 2019.
- [29] “Norme RE2020 : impact économique de la réforme sur les logements neufs.”, Vie publique.fr. <https://www.ecologie.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus> [Accessed: 08 Jul. 2021], 2020.
- [30] Ministère de la transition écologique, “RE 2020, Eco-construire pour le confort de tous”, Dossier de presse, p. 22, 2021.
- [31] “RE2020 : Une nouvelle étape vers une future réglementation environnementale des bâtiments neufs plus ambitieuse contre le changement climatique.”, Ministère de la Transition écologique. <https://www.ecologie.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus>. [Accessed: 07 Jul. 2021], 2020.
- [32] Crippa, M. et al., “Fossil CO2 emissions of all world countries.”, EUR 30358 EN, “Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/143674, 2020.
- [33] “Report from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions.” Rapport de la Commission Européenne, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A52017DC0654&from=EN>, p. 41, 2020.
- [34] “Ergonomie des ambiances thermiques : détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.”, 3rd ed. Genève, Suisse : ISO, 2005.
- [35] M. Bruant et al., “Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d’ambiance.”, 1997.
- [36] R. de Dear and G. Schiller Brager, “The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment.”, *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, no. 2, pp. 100–108, doi : 10.1007/s004840100093, 2001.
- [37] R. and A.-C. Engineers. “American Society of Heating, 2001 ASHRAE handbook : fundamentals.”, Atlanta, GA.: ASHRAE, 2001.
-

- [38] “ISO 8996:2004 - Ergonomics of the thermal environment -- Determination of metabolic rate, iTeh Standards Store.”, <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/746bf922-6c94-41f3-8567-941216ea4ac1/iso-8996>, [Accessed: 22 Mar. 2021], 2004.
- [39] S. G. Bulti and N. Y. Gabore, “Performance Evaluations and Comparison of Selected Addis Ababa Sub-city Administration Buildings in Terms of Thermal Comfort.”, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 8, no. 2, pp. 44–51, doi : 10.12691/ajcea-8-2-3, 2020.
- [40] D. J. Wessel et al., “Ashrae hvac fundamentals handbook.” p. 892, 2001.
- [41] P. Höpfe, “Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort.”, *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 6, pp. 661–665, doi : [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8), 2002.
- [42] H. Sari and C. Herrmann, “Assessment of risk of discomfort due to thermal transients based on a computer model of thermoregulation.”, Centre d'Etudes de Physiologie Appliquée (CNRS), Strasbourg, France, p. 4, 1998.
- [43] R. de Dear and G. Brager, “Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55’”, *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 549–561, doi : 10.1016/S0378-7788(02)00005-1, 2002.
- [44] B. Moujalled, “Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés.”, Thèse de l'INSA de Lyon, p .330, 2007.
- [45] A. P. Gagge et al., “A standard predictive index of human response to the thermal environment.”, *Ashrae Transactions*, vol. 92, pp. 709–731, 1986.
- [46] R. de Dear et al., “Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference - Final Report on RP-884.”, vol. 104. 1997.
- [47] J. Liu et al., “A method to weight three categories of adaptive thermal comfort.”, *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 312–320, doi : 10.1016/j.enbuild.2011.12.007, 2012.
- [48] K. J. McCartney and J. Fergus Nicol, “Developing an adaptive control algorithm for Europe.”, *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 6, pp. 623–635, doi : 10.1016/S0378-7788(02)00013-0, 2002.
- [49] Association française de normalisation, “Norme française NF EN 15251 Critères d’ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l’air intérieur, la thermique, l’éclairage et l’acoustique.”, La Plaine-Saint-Denis: Afnor éd., 2007.
- [50] Documents Techniques Unifiés, DTU N°65.8, “Exécution des Planchers Chauffants utilisant des Tubes en Matériaux de Synthèse à Eau Chaude.”, 1990.
- [51] Fauconnier, Roland. "L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires." *Chauffage, ventilation, conditionnement* 68.10: 57-62, 1992.

-
- [52] S. Firląg, “Impacts of airflows, internal heat and moisture gains on accuracy of modeling energy consumption and indoor parameters in passive building.”, *Energy and Buildings*, p. 12, 2013.
- [53] Eric VORGER, “Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment.”, Thèse de l'École nationale supérieure des mines de Paris, p. 474, 2014.
- [54] J.-M. Cayla et al., “From Practices to Behaviors: Estimating the Impact of Household Behavior on Space Heating Energy Consumption.”, p. 13, 2010.
- [55] “Méthode de calcul TH-C-E ex.”, Centre scientifique et technique du bâtiment, p. 192, 2008.
- [56] Nicol, J. Fergus. “Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans.”, *Proceedings of the seventh international IBPSA conference, Rio. Vol. 2*, 2001.
- [57] R. Andersen et al., “Survey of occupant behavior and control of indoor environment in Danish dwellings.”, *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 11–16, doi : 10.1016/j.enbuild.2008.07.004, 2009.
- [58] B. Cao et al., “Individual and district heating: A comparison of residential heating modes with an analysis of adaptive thermal comfort.”, *Energy and Buildings*, vol. 78, pp. 17–24, doi : 10.1016/j.enbuild.2014.03.063, 2014.
- [59] T. Peffer et al., “How people use thermostats in homes: A review.”, *Building and Environment*, vol. 46, pp. 2529–2541, 2011.
- [60] X. Xu et al., “Energy Saving Alignment Strategy: Achieving energy efficiency in urban buildings by matching occupant temperature preferences with a building’s indoor thermal environment.”, *Applied Energy*, vol. 123, pp. 209–219, doi : 10.1016/j.apenergy.2014.02.039, 2014.
- [61] M. BONTE, “Influence du comportement de l’occupant sur la performance énergétique du bâtiment.”, Thèse de l'Université de Toulouse, p. 206, 2014.
- [62] L. Gondian et al., “Évaluation de l’influence des occupants sur le confort estival: utilisation des analyses d’incertitude et de sensibilité.”, p. 9, 2018.
- [63] F. Abachi et al., “Les besoins d’eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif,” ADEME, Comité scientifique et technique des industries climatiques, p. 26, 2016.
- [64] T. Csoknyai et al., “Analysis of energy consumption profiles in residential buildings and impact assessment of a serious game on occupants’ behavior.”, *Energy and Buildings*, vol. 196, pp. 1–20, doi : 10.1016/j.enbuild.2019.05.009, 2019.
- [65] “KNX Advanced Course Documentation.”, KNX Association, p. 374, 2019.
- [66] “Interworking Datapoint types.”, KNX Association, p. 251, 2005.

- [67] M. Sturk, C Fetie, “Consommation d’énergie en 2017.”, Service de presse d’Eurostat, Eurostat, 2019.
- [68] “Fichier météo RT2012.”, http://www.rt-batiment.fr/IMG/zip/fichiers_meteo_rt2012.zip.
- [69] O. A. Seppänen et al., “Association of Ventilation Rates and CO2 Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings.”, *Indoor Air*, vol. 9, no. 4, pp. 226–252, doi : <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x>, 1999.
- [70] J. A. Duffie and W. A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes.”, 4^{ème} édition, *Solar Engineering of Thermal Processes*, University of Wisconsin-Madison, p. 928, 2013.
- [71] J. Hallal, “Experimental optimization of the Si photovoltaic panels cooling system on maximum allowable temperature criteria.”, *Renewable Energy Focus*, vol. 35, p. 4, 2020.
- [72] M. Saidan, “Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment.”, *Renewable Energy*, p. 7, 2016.
- [73] P. Bacot et al., “Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment.”, *Revue Générale de Thermique*, vol. 23, pp. 189–201, 1984.
- [74] B. Peuportier, “Validation of COMFIE.”, Université de Stuttgart (I.T.W.), Rapport C.E.C, 1989.
- [75] B. Peuportier and I. blanc Sommereux, “Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings.”, *International Journal of Solar Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 109–120, doi: 10.1080/01425919008909714, 1990.
- [76] Bruno Peuportier. “Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique.” Journée thématique IBPSA France - SFT 2005, outil de simulation thermo-aéraulique du bâtiment, La Rochelle, France, 2005.
- [77] A. Guiavarch, “Etude de l’amélioration de la qualité environnementale du bâtiment par intégration de composants solaires.”, Thèse de l'Université de Cergy-Pontoise, 2003.
- [78] S. Thiers, “Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive.”, Thèse de l'École nationale supérieure des Mines de Paris, p. 256, 2008.
- [79] T. Salomon et al., “Outil de simulation thermique du bâtiment, Comfie.”, Journée thématique SFT-IBPSA, La Rochelle, p. 8, 2005.
- [80] B. Polster, “Contribution à l’étude de l’impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie.”, Thèse de l'École nationale supérieure des Mines de Paris, 1995.
- [81] M. Trocmé and B. Peuportier, “Analyse de cycle de vie d’un bâtiment.”, *Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, vol. 7, doi : 10.1051/j3ea:2008034, 2008.
- [82] G. Herfray, “Contribution à l’évaluation des impacts environnementaux des quartiers.”, Thèse de l'École nationale supérieure des Mines de Paris, 2011.



- [83] P. Hollmuller, “Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique.”, Thèse de l'Université de Genève, 2014.


ANNEXES

6. Annexe

6.1. Caractéristiques techniques des matériaux

6.1.1. Le Métisse



> L'OPTIMISATION THERMO-ACOUSTIQUE
Métisse® RT est préconisé pour une isolation en murs, sous-toitures et planchers. Il vous apportera une rapidité et un confort de pose sans précédents ! Rouleau ou panneau : à vous de choisir !






| PRODUIT | RT | LARGEUR | Valeur R |
|---------|----------------|---------|-----------|
| | épaisseur (mm) | (m) | spécifiée |
| | 50 | 0,6 | R=1,25 |
| | 80 | | R=2,05 |
| | 100 | | R=2,55 |
| | 120 | | R=3,05 |
| 145 | R=3,70 | | |
| 200 | R=5,10 | | |

Autres largeurs sur demande. (1) Uniquement en panneau

COMPOSITION

85% coton recyclé

- 15% liant polyester
- Traitement à coeur avec des adjuvants : ignifuges, anti-fongiques et anti-bactériens (1%)

| | | |
|--------------|---|---|
| PERFORMANCES |  Thermique | Conductivité thermique : $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$ Chaleur spécifique : $C_p = 1600 \text{ J/kg.K}$ (cf règles Th-U) Déphasage : 6 à 8h* |
| |  Comportement à l'eau | Capacité d'absorption d'eau (NF EN 1609) : Wp = 7,04 kg/m² Humidification partielle (norme ACERMI) : $\Delta = 0\text{mm}$ (soit aucune variation d'épaisseur constatée) |
| |  Mécanique | Densité : 20 kg/m³ Résistance traction parallèle (NF EN 1607) : Fmax = 704 N/m² Résistance traction longitudinale (NF EN 1608) : Fmax = 7,1 kN/m² Reprise d'épaisseur après compression : 100% |
| |  Biologique | Résistance fongique (EN ISO 846 - Conidia) : Classe 0 (Inerte) (le milieu n'est pas propice au développement de moisissures) |
| |  Feu | Produit seul : Euroclasse E |

*Tests réalisés par des laboratoires indépendants et accrédités selon les normes en vigueur
*à partir d'une épaisseur nominale de 100 mm

LE RELAIS

présente

métisse®
L'isolation durable

Figure 6-1. Caractéristiques du métisse®

6.1.2. Pare-vapeur Vario® KM Duplex UV

Données techniques

| Propriétés | Symboles | Unités | Val. mesurée | Normes |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------|
| Épaisseur | d | [mm] | 0.20 | - |
| Classe de réaction au feu | Classe RF | [–] | RF3 (cr) | AEAI |
| Valeur Sd | s | [m] | 0.3 – 5 | SIA 279 |
| Température limite d'emploi | θ_{max} | [°C] | 80 | - |
| Poids surfacique | m | [g/m ²] | 57 | - |
| Résistance à la déchirure au clou | σ_{zug} | [N] | ≥ 90 | EN 12310-1 |
| Résistance à la traction | $\sigma_{zug max}$ | N/50 mm | ≥ 110 | EN 12310-2 |

Assortiment

| Prix hors TVA | | | | Colis isolé (CI) | | Palettes perdues (PA) | |
|----------------|---|----------------------------|----------------|------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| Largeurs cm | ⊘ | Prix CHF/m ² | Longueurs m | Rouleaux | m ² | CI | m ² |
| 150 | - | 3.60 | 40 | 1 | 60 | 42 | 2520 |

Figure 6-2. Caractéristiques du pare-vapeur

6.2. Caractéristiques techniques des équipements

6.2.1. VMC DF Domeo

DOMEO 210

NOUVEAU





Modbus

DOMEO FILAIRE

DOMEO RADIO

DOMEO APP

DOMEO HYGR

Rendement
jusqu'à
92%

Très basse
Consommation
18W-Th-C

Ultra
compact

Jusqu'à
4 sanitaires

Débit
210 m³/h

Domotisable

By-pass
100%

Maisons
climatisées

| | |
|-------------------|---------|
| DOMEO 210 RD | 600 094 |
| DOMEO 210 FL | 600 095 |
| DOMEO 210 HY | 600 096 |
| DOMEO 210 APP | 600 097 |
| Kit filtres M5/G4 | 600 921 |
| Kit filtres F7/G4 | 600 903 |

Efficacité - Universalité

- Débit : 210 m³/h.
- Pour tout type de maison du T3 au T5.
- Jusqu'à 4 sanitaires.
- Niveau sonore : 27 dB(A)
- Système à débits constants modèle DOMEO RD
 - Intègre la perte de charge du réseau ;
 - Efficacité indépendante de l'état des filtres ;
 - Passage en grande vitesse sans modification des débits sanitaires ;
 - 1 seul réseau d'extraction pour sanitaires et cuisine.
- Permet de gérer directement une batterie de pré ou post-chauffage.
- Connectable à une sonde proportionnelle (CO₂, thermostat, SQA...).
- Connectable à une commande tout ou rien (inter, sonde HR ou T°, détection de présence).

Installation et entretien aisés

- Montage vertical mural en volume chauffé.
- Format ultra compact 600x321x808 mm.
- Faible poids : 15Kg, structure polypropylène.
- Accès aux filtres et à tous les composants internes en façade.
- Étudiée pour la gestion spécifique des condensats en été comme en hiver.

Gestion des températures

- By-pass 100% : automatique et manuel.
- En été : rafraîchissement de l'air avec possibilité de forçage manuel.
- En hiver : réchauffement de l'air.

Gamme 4 modèles

- Autoréglable RadioDOMEO RD.
- Autoréglable FilaireDOMEO FL.
- Hygroréglable.....DOMEO HY.
- Autoréglable Smartphone...DOMEO APP.

Qualité d'air intérieur

Double filtration

- à l'introduction d'air neuf pour la santé des occupants :
 - Filtre M5 (option F7)
- à l'extraction pour protéger l'échangeur :
 - Filtre G4

Domotique

Pilotage à distance de Domeo

Peut-être intégrée au système domotique de la maison. Équipée du protocole Modbus : Communication universelle via passerelles vers tous les autres protocoles (KNX, X2D, MyHome...).

Commande

- Version RD : télécommande radio multi fonctions + console de programmation.
- Version FL : commande filaire multi fonctions.
- Version HYGR0 : commande filaire multi fonctions + console de programmation.
- Version APP : téléchargement de l'application pour Android et Apple.



- 1 - Permet de piloter le débit de base et le mode absence.
- 2 - Permet de piloter la fonction Boost cuisine temporisé 1/2h
- 3- Permet de forcer manuellement le By-pass : temporisée 8h et d'annuler l'alarme filtres.

p14

Les meilleures solutions VMC

Figure 6-3. Caractéristiques techniques de la VMC DF

6.2.2. Pompe à chaleur

| Description | Unité | 6 | 8 | 12 | 15 |
|--|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Limite de fonctionnement min. (en chauffage) | °C | -20 | -20 | -20 | -20 |
| Limite de fonctionnement max. (en chauffage) | °C | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Limite de fonctionnement min. (en rafraîchissement) | °C | 5 | 0 | 0 | 0 |
| Limite de fonctionnement max. (en rafraîchissement) | °C | 46 | 46 | 46 | 46 |
| Caractéristiques avec radiateurs | | | | | |
| (départ : 45°C, retour : 40°C, température sèche (humide) 7 (6)°C) | | | | | |
| Puissance chauffage | kW | 5.8 | 7.4 | 12.95 | 14 |
| Consommation électrique nominale | kW | 1.9 | 2.34 | 4.3 | 4.36 |
| Intensité électrique nominale | A | 8.3 | 10 | 18.7 | 19 |
| COP* A7(6) W45-40 | | 3.01 | 3.16 | 3.01 | 3.21 |
| Caractéristiques avec plancher chauffant | | | | | |
| (départ : 35°C, retour : 30°C, température sèche (humide) : 7 (6)°C) | | | | | |
| Puissance chauffage | kW | 5.8 | 7.2 | 11.9 | 14.5 |
| Consommation électrique nominale | kW | 1.38 | 1.84 | 3.04 | 3.57 |
| Intensité électrique nominale | A | 6 | 8 | 13.2 | 15.6 |
| COP* A7(6) W35-30 | | 4.20 | 3.91 | 3.91 | 4.06 |
| Caractéristiques en rafraîchissement | | | | | |
| (départ : 18°C, retour : 23°C, température sèche 35°C) | | | | | |
| Puissance frigorifique | kW | 7 | 7.8 | 13.5 | 16 |
| Consommation électrique nominale | kW | 1.93 | 1.99 | 3.73 | 4.2 |
| Intensité électrique nominale | A | 8.3 | 8.6 | 16.2 | 18.3 |
| EER** A35 W18-23 | | 3.61 | 3.9 | 3.61 | 3.81 |
| (départ : 7°C, retour : 12°C, température sèche 35°C) | | | | | |
| Puissance frigorifique | kW | 4.7 | 5.8 | 10.2 | 13 |
| Consommation électrique nominale | kW | 1.6 | 1.99 | 3.5 | 4.5 |
| Intensité électrique nominale | A | 7 | 8.6 | 15.2 | 19.6 |
| EER** A35 W7-12 | | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 |
| Circuit frigorifique | | | | | |
| Type de fluide frigorigène | | | | | |
| Quantité de fluide frigorigène | kg | 1.13 | 1.81 | 2.485 | 3.385 |
| Type de compresseur | | | | | |
| Type d'huile | | | | | |
| Type de détendeur | | | | | |
| Vitesse de rotation du ventilateur | tr/min | 1000 | 1000 | 805 | 1050 |
| Pression maximale de service (PS) | bar | 45 | 45 | 45 | 45 |
| | Pa | 45 x 10 ⁵ | 45 x 10 ⁵ | 45 x 10 ⁵ | 45 x 10 ⁵ |
| Circuit hydraulique | | | | | |
| Pression max. | bar | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | Pa | 3 x 10 ⁵ | 3 x 10 ⁵ | 3 x 10 ⁵ | 3 x 10 ⁵ |
| Pression min. | bar | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | Pa | 50 x 10 ³ | 50 x 10 ³ | 50 x 10 ³ | 50 x 10 ³ |
| Débit d'eau nominal en chauffage | l/h | 1000 | 1200 | 2100 | 2500 |
| Débit seuil de détection | l/h | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Volume min. de l'installation | l | 21 | 28 | 42 | 49 |

| Description | Unité | 6 | 8 | 12 | 15 |
|---|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Volume max. du circuit PAC, sans vase supplémentaire, pour une température de départ d'eau à 35°C | l | 65 | 65 | 95 | 95 |
| Température de consigne de départ minimum (en chauffage) | °C | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Température de consigne de départ maximum (en chauffage) | °C | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Température de consigne de départ minimum (en rafraîchissement) | °C | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Température de consigne de départ maximum (en rafraîchissement) | °C | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Volume d'eau dans la pompe à chaleur | l | 1 | 1.2 | 2.3 | 2.3 |
| Électrique | | | | | |
| Tension d'alimentation | V/Hz | | | | |
| Fusible | A | 15 Type B | 15 Type B | 25 Type D | 25 Type D |
| Puissance maximale absorbée (P max) | kW | 2.3 | 2.7 | 5.1 | 5.1 |
| Intensité maximale absorbée (I max) | A | 11 | 14 | 23 | 20 |
| Protection électrique | | IPX4 | IPX4 | IPX4 | IPX4 |
| Classe électrique | | 1 | 1 | 1 | 1 |

Figure 0-4. Caractéristiques techniques de la pompe à chaleur

6.2.3. Panneaux photovoltaïques

PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES

| Paramètres électriques (Conditions de Test Standard - STC) | | | | | | | | | |
|--|-------------------|---|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Référence du module | | | Yingli P-29b (600c=P _{max}) | | | | | | |
| Puissance maximale | P _{max} | W | 260 | 255 | 250 | 245 | 240 | 235 | 230 |
| Tolérance de puissance | ΔP _{max} | W | 0 / 5 | | | | | | |
| Rendement du module | η _m | % | 15,9 | 15,6 | 15,3 | 15,0 | 14,7 | 14,4 | 14,1 |
| Tension à P _{max} | V _{MPP} | V | 30,9 | 30,6 | 30,4 | 30,2 | 29,5 | 29,5 | 29,5 |
| Courant à P _{max} | I _{MPP} | A | 8,41 | 8,32 | 8,24 | 8,11 | 8,14 | 7,97 | 7,80 |
| Tension circuit ouvert | V _{oc} | V | 38,9 | 38,7 | 38,4 | 37,8 | 37,5 | 37,0 | 37,0 |
| Courant de court-circuit | I _{sc} | A | 8,98 | 8,88 | 8,79 | 8,63 | 8,65 | 8,54 | 8,40 |

STC : irradiance 1000 W/m², température de cellule 25 °C, AM1.5g selon EN 60904-3. Baisse moyenne de rendement relatif de 5% à 200 W/m² selon EN 60904-1.

| Paramètres électriques (Conditions NOCT) | | | | | | | | | |
|--|------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Puissance maximale | P _{max} | W | 188,3 | 184,7 | 181,1 | 177,9 | 174,3 | 170,7 | 167,0 |
| Tension à P _{max} | V _{MPP} | V | 28,1 | 27,9 | 27,6 | 27,2 | 26,6 | 26,6 | 26,6 |
| Courant à P _{max} | I _{MPP} | A | 6,70 | 6,63 | 6,56 | 6,54 | 6,56 | 6,42 | 6,29 |
| Tension circuit ouvert | V _{oc} | V | 35,9 | 35,7 | 35,4 | 34,5 | 34,2 | 33,8 | 33,8 |
| Courant de court-circuit | I _{sc} | A | 7,27 | 7,19 | 7,12 | 6,99 | 7,01 | 6,92 | 6,81 |

NOCT : modules en circuit ouvert, irradiance 800 W/m², Température ambiante 20°C, vitesse du vent 1 m/s

CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES

| | | | |
|--|------------------------------|------|----------|
| Température nominale des cellules en service | NOCT | °C | 46 +/- 2 |
| Coefficient de température gamma pour P _{max} | γ | %/°C | -0,45 |
| Coefficient de température pour Voc | β _{Voc} | %/°C | -0,33 |
| Coefficient de température pour Isc | α _{Isc} | %/°C | 0,06 |
| Coefficient de température pour V _{MPP} | β _{V_{MPP}} | %/°C | -0,45 |

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

| | |
|--|----------------------|
| Tension max. du système | 1000 V _{DC} |
| Calibre unitaire des fusibles en série | 15 A |
| Limitation de courant inverse | 15 A |
| Température de fonctionnement | -40°C à 85°C |
| Charge statique maximale admissible, face avant (neige et vent) | 5400 Pa |
| Charge statique maximale admissible, face arrière (vent) | 2400 Pa |
| Impact de grêlons maximal (diamètre grêlons / vitesse de l'impact) | 25 mm / 23 m/s |

ÉLÉMENTS CONSTITUANTS

| | |
|--|--|
| Verre frontal (matériau / épaisseur) | verre trempé faible émissivité / 3,2 mm |
| Cellules (quantité / matériau / dimensions / nombre de busbars) | 60 / silicium multicristallin / 156 mm x 156 mm / 2 ou 3 |
| Encapsulant (matériau) | éthylène-acétate de vinyle (EVA) |
| Cadre (matériau / couleur / couleur de l'anodisation / joint de cadre) | alliage d'aluminium anodisé / argent / transparent / silicone ou joint adhésif |
| Boîte de jonction (degré de protection) | ≥ IP65 |
| Câbles de sortie (longueur / section de câble) | 1100 mm / 4 mm ² |
| Connecteurs (type / degré de protection) | MCA / IP67 ou YTO8-1 / IP67 ou Amphénol H4 / IP68 |

* Conséquence d'une innovation permanente et de nos efforts en R&D, nos produits s'améliorent sans cesse. Ainsi les informations fournies par cette fiche sont sujettes à modifications sans avertissement préalable. Les données sont susceptibles de changer légèrement et sont donc fournies à titre indicatif.
 * Les données ne font pas référence à un module en particulier. Elles ne font pas partie intégrante de l'offre. Elles sont fournies à titre de comparaison avec les autres types de modules.

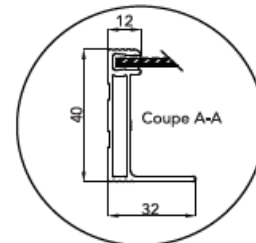
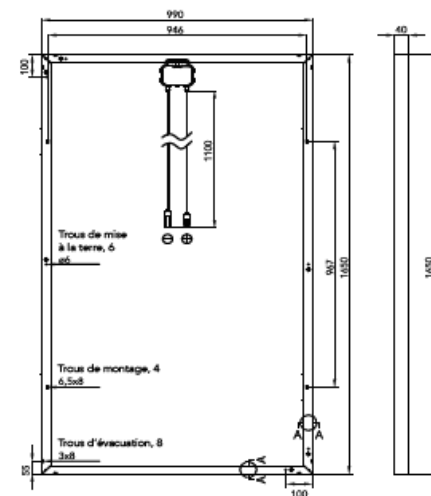
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

| | |
|---|--------------------------|
| Dimensions (longueur / largeur / hauteur) | 1650 mm / 990 mm / 40 mm |
| Poids | 19,1kg |

CONDITIONNEMENT

| | |
|---|-----------------------------|
| Nombre de modules par palette | 26 |
| Nombre de palettes par container de 40" | 28 |
| Dimensions du carton (longueur / largeur / hauteur) | 1700 mm / 1150 mm / 1190 mm |
| Poids du carton en kg | 534 kg |

Unité : mm



Attention : Lisez attentivement le "Manuel d'installation et de l'utilisateur" avant de manipuler, installer et mettre en service les modules Yingli Solar.

Nos Partenaires :

Figure 6-5. Caractéristiques techniques des panneaux photovoltaïques

6.2.4. Panneau thermique

| Description | Unité | SRD 2.3 | SRV 2.3 | SRH 2.3 |
|---|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Absorbeur | | Serpentin | Serpentin avec collecteur | Serpentin avec collecteur |
| Revêtement de l'absorbeur | | Revêtement hautement sélectif | Revêtement hautement sélectif | Revêtement hautement sélectif |
| Poids net | kg | 37 | 38 | 38 |
| Volume | l | 1.35 | 1.85 | 2.16 |
| Pression maximale | bar | 10 | 10 | 10 |
| | kPa | 1000 | 1000 | 1000 |
| Surface hors tout | m ² | 2.51 | 2.51 | 2.51 |
| Surface absorbeur | m ² | 2.35 | 2.35 | 2.35 |
| Absorptivité de l'absorbeur (α) | % | 95 | 95 | 95 |
| Emissivité de l'absorbeur (ϵ) | % | 5 | 5 | 5 |
| Type de verre | | Verre de sécurité structuré | Verre de sécurité structuré | Verre de sécurité structuré |
| Rendement optique η_0 | % | 80.1 | 79 | 80.1 |
| Coefficient linéaire de transfert thermique k1 | W/(m ² k) | 3.76 | 2.41 | 3.32 |
| Coefficient quadratique de transfert thermique k2 | W/(m ² k ²) | 0.012 | 0.049 | 0.023 |
| Température maximale | °C | 170 | 170 | 170 |
| Puissance maximale | kW | 1.88 | 1.86 | 1.88 |
| Capacité thermique | kJ/m ² k | 7.36 | 8.09 | 9.9 |
| Largeur capteur solaire | mm | 1233 | 2033 | 1233 |
| Longueur capteur solaire | mm | 2033 | 1233 | 2033 |
| Épaisseur capteur solaire | mm | 80 | 80 | 80 |

Figure 6-6. Caractéristiques techniques du panneau thermique

6.2.5. Ballon ECS

| Ballon HeliSet autovidangeable | | FE S1 150 BID | FE S1 250 BID | FE S1 350 BD | FE S1 350 BD P | FE S2 250 BID | FE S1 150 BIDE | FE S1 250 BIDE | FE S1 350 BDE | FE S1 350 BDE P | |
|---|---------------|------------------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------|
| Classe d'efficacité énergétique | | B | B | B | B | B | B | B | B | B | ErP |
| Capacité réelle du ballon | litres | 162 | 254 | 35 | 335 | 246 | 162 | 254 | 335 | 335 | RT 2012 |
| Température max de l'eau dans le ballon | °C | 85 | 85 | 5 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | |
| Masse à vide du ballon (avec isolation) | kg | 89 | 111 | 51 | 151 | 126 | 93 | 114 | 151 | 151 | |
| Hauteur maximale entre le ballon et le capteur | m | 8,5 | 8,5 | 5,5 | 12 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 12 | |
| Consommation d'entretien Qpr | kWh / 24 h | 1,25 | 1,47 | 0,71 | 1,71 | 1,56 | 1,25 | 1,47 | 1,71 | 1,71 | |
| Constance de refroidissement Cr | Wh / jour.L.K | 0,172 | 0,128 | 0,113 | 0,113 | 0,14 | 0,172 | 0,128 | 0,113 | 0,113 | |
| Pertes thermiques Ua | W / K | 1,16 | 1,36 | 1,58 | 1,58 | 1,44 | 1,16 | 1,36 | 1,58 | 1,58 | RT 2012 |
| Hystérésis du thermostat du ballon | °C | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | |
| N° de zone de régulation | | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| Caractéristiques hydrauliques | | | | | | | | | | | |
| Pression max du circuit d'eau | bars | 10 | | | | | | | | | |
| Pression max du circuit solaire | | Pression atmosphérique | | | | | | | | | |
| Échangeur solaire | | | | | | | | | | | |
| Hauteur relative de l'échangeur | % | 77 | 51 | 49 | 49 | 51 | 77 | 51 | 49 | 49 | RT 2012 |
| Surface d'échange | m² | 1,3 | 1,3 | 1,6 | 1,6 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,6 | 1,6 | |
| Volume du fluide solaire | litres | 8,9 | 8,9 | 11 | 11 | 8,9 | 8,9 | 8,9 | 11 | 11 | |
| Température max du fluide solaire | °C | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | |
| Appoint hydraulique / électrique | | | | | | | | | | | |
| Volume chauffé par l'appoint hydraulique / électrique | litres | - / - | - / - | - / - | - / - | 115 / - | - / 162 | - / 254 | - / 335 | - / 336 | |
| Fraction de l'appoint Faux | | - / - | - / - | - / - | - / - | 0,5 / - | - / 0,5 | - / 0,5 | - / 0,5 | - / 0,5 | RT 2012 |
| Hauteur relative de l'échangeur | % | - / - | - / - | - / - | - / - | 53 / - | - / 18 | - / 12 | - / 12 | - / 12 | |
| N° de zone de l'élément chauffant | | - / - | - / - | - / - | - / - | 3 / - | - / 1 | - / 1 | - / 1 | - / 1 | |
| N° de zone de la régulation | | - / - | - / - | - / - | - / - | 3 / - | - / 3 | - / 3 | - / 2 | - / 2 | |
| Température max de l'eau de chauffage | °C | - / - | - / - | - / - | - / - | 85 / - | - / - | - / - | - / - | - / - | |
| Capacité de l'échangeur | litres | - / - | - / - | - / - | - / - | 5,6 / - | - / - | - / - | - / - | - / - | |
| Perte de charge de l'échangeur à 1 m³/h | mbars | - / - | - / - | - / - | - / - | 46 / - | - / - | - / - | - / - | - / - | |
| Puissance de l'appoint électrique | kW | - / - | - / - | - / - | - / - | - / - | - / 2,5 | - / 2,5 | - / 2,5 | - / 2,5 | |
| Caractéristiques électriques | | | | | | | | | | | |
| Tension de fonctionnement | V / Hz | 230 / 50 | 230 / 50 | 230 / 50 | 230 / 50 | 230 / 50 | 230 / 50 | 230 / 50 | 230 / 50 | 230 / 50 | |
| Puissance max absorbée (hors appoint électrique) | W | 75 | 75 | 75 | 145 | 75 | 75 | 75 | 75 | 145 | |
| Puissance nominale de la pompe | W | 36,5 | 36,5 | 36,5 | 73 | 36,5 | 36,5 | 36,5 | 36,5 | 73 | RT 2012 |
| Indice de protection électrique | | IPX1 | IPX1 | IPX1 | IPX1 | IPX1 | IP21 | IP21 | IP21 | IP21 | |
| Classe électrique | | I | I | I | I | I | I | I | I | I | |

Figure 0-7. Caractéristiques techniques du ballon d'ECS

6.3. Plan d'installation des capteurs dans le bâtiment

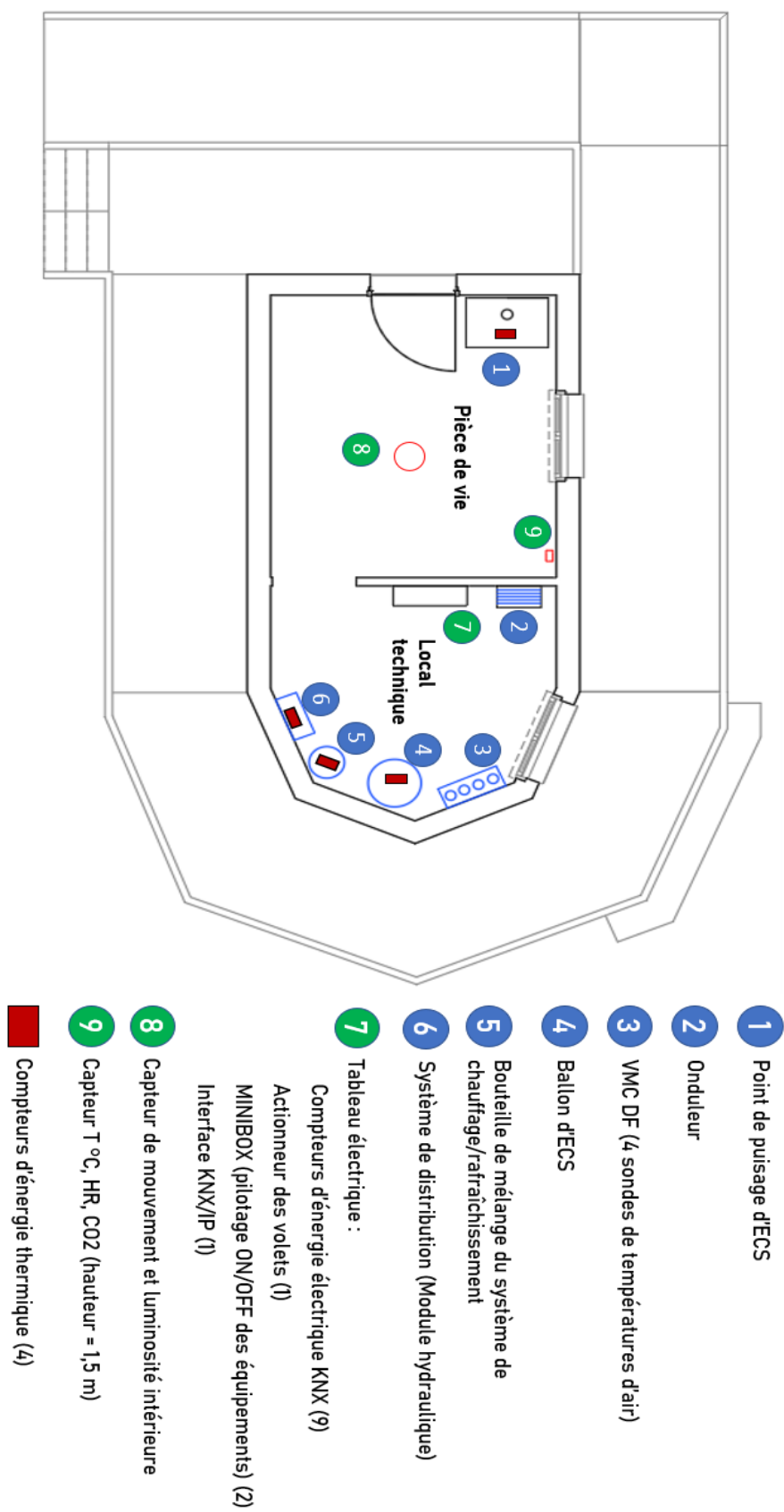


Figure 06-8. Plan d'installation des capteurs

