
**Analyse de la contribution du bâti wallon à la gestion des réseaux électriques.
Étude de la flexibilité de la demande de chauffage d u**

Auteur : Botquin, Grégoire

Promoteur(s) : Andre, Philippe; 2770

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en énergies renouvelables

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3187>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de
l'Environnement
Building Energy Monitoring & Simulation
(BEMS)

Faculté des Sciences,
de la Technologie et de la
Communication
Research Unit in Engineering Science
(RUES)

Analyse de la contribution du bâti wallon à la gestion des réseaux électriques. Étude de la flexibilité de la demande de chauffage d'un bâtiment représentatif.

Grégoire Botquin

Mémoire présenté en vue de l'obtention des diplômes de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement – finalité Énergies Renouvelables (ULg)
Master en Développement Durable – finalité Énergie-Environnement (uni.lu)

Promoteur : Prof. Philippe André

Année académique 2016 - 2017

Comité de lecture :

Prof. Philippe André, Prof. Frank Scholzen, Pauline Abrahams, Dr. Sébastien Thomas

Table des matières

Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	vi
Liste des équations.....	ix
Liste des Abréviations.....	x
Remerciements.....	xi
Introduction.....	1
1 Etat des lieux.....	3
1.1 Des réseaux électriques traditionnels au concept de <i>Power-to-Heat</i> (PtH).....	3
1.1.1 Les réseaux électriques traditionnels et leurs problématiques.....	3
1.1.2 <i>Solutions apportées par les Smart Grids</i>	5
1.1.3 Le concept de <i>Power-To-Heat</i>	6
1.2 Les techniques de stockage thermique appliquées au résidentiel.....	8
1.2.1 Le stockage de chaleur sensible.....	8
1.2.2 Le stockage de chaleur dans la masse thermique du bâtiment.....	9
1.2.3 Le stockage par chaleur latente.....	11
1.2.4 Le stockage thermochimique.....	12
1.2.5 Comparaisons des modes de stockage.....	13
1.3 Les pompes à chaleur.....	14
1.4 Analyse du parc immobilier en Région wallonne.....	17
1.4.1 Méthodologie de détermination des bâtiments de référence.....	17
1.4.2 Caractéristiques du parc immobilier de la Région wallonne.....	18
1.4.3 Potentiel de rénovation et état de l'isolation du parc immobilier.....	20
2 Méthodologie.....	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Sélection du type de bâtiment étudié.....	21
2.2.1 Critères de sélection du bâtiment étudié.....	21
2.2.2 Présentation du bâtiment choisi pour l'étude.....	23
2.3 Modélisation du bâtiment type et définition de ses paramètres de fonctionnement.....	25
2.3.1 Modélisation du bâtiment dans SketchUp.....	25
2.3.2 Modélisation dans le logiciel TRNSYS.....	26
2.3.3 Paramétrage du modèle.....	28
2.4 Analyse des paramètres de chauffe.....	30
2.5 Analyse de la flexibilité.....	33

2.5.1	Scénario de simulation de base et indicateurs étudiés.....	33
2.5.2	Variantes du scénario de base.....	36
3	Résultats.....	40
3.1	Résultats de l'analyse des paramètres de chauffe du bâtiment	40
3.2	Résultats de l'analyse de flexibilité	46
3.2.1	Scénarios avec les variantes d'isolation	46
3.2.2	Scénarios avec variantes de ventilation	62
3.2.3	Scénarios avec variantes d'inertie thermique.....	72
3.2.4	Combinaisons des indicateurs de confort thermique et de performance.....	77
4	Discussion.....	79
	Conclusion	82
	Bibliographie	84
ANNEXE A:	Scénarios d'occupation et profils de gains internes.....	89
ANNEXE B:	Dimensionnement de la puissance de chauffe	90
ANNEXE C:	Dimensionnement des débits de ventilation et du dimensionnement de la puissance de chauffe associée	92
ANNEXE D:	Script VBA d'automatisation des analyses paramétriques	95
ANNEXE E:	Liste des scénarios testés en essai-erreur non retenus	101

Liste des figures

Figure 1 Structure du réseau électrique "traditionnel" [22]	3
Figure 2 Évolution du mix énergétique allemand[28].....	4
Figure 3 Exemple d'application de la flexibilité de la demande illustré par un profil de charge. [26]....	6
Figure 4 Stockage énergétique "intersectoriel". [35].....	7
Figure 5 Illustration d'un déphasage thermique en fonction de l'inertie du bâtiment. [41]	9
Figure 6 Inertie d'une paroi avec isolation intérieure (à gauche) et d'une paroi avec isolation extérieure (à droite). [43].....	11
Figure 7 Évolution de la température en fonction de l'énergie stockée par chaleur latente.[37]	11
Figure 8 Schéma de fonctionnement d'un stockage thermochimique	13
Figure 9 Les 4 étapes du fonctionnement d'une pompe à chaleur.[46]	14
Figure 10 Diagramme enthalpique du cycle thermodynamique de la pompe à chaleur[48]	15
Figure 11 Exemple d'évolution de COP en fonction de la température de la source froide et de la source chaude. [47]	16
Figure 12 Répartition du parc immobilier résidentiel en Région wallonne en 2015, d'après [52]	18
Figure 13 Répartition de la typologie des bâtiments par année de construction d'après [1]	19
Figure 14 Évolution du nombre cumulé de constructions depuis 1982, d'après [52]	20
Figure 15 Illustration du bâtiment type choisi [60].....	23
Figure 16 Plans des différents étages du bâtiment choisi [55]	24
Figure 17 Modélisation du bâtiment. Façade avant, orientation sud.....	26
Figure 18 Modélisation du bâtiment. Façade arrière, orientation nord.....	26
Figure 19 Modèle TRNSYS de base.....	27
Figure 20 Modèle TRNSYS de base : détail de la macro « Set Temperature ».....	28
Figure 21 Évolution de la température extérieure du mois de janvier à St Hubert.....	29
Figure 22 Irradiation solaire du mois de janvier à St-Hubert	29
Figure 23 Notions d'impact énergétique et de surconsommation lors de l'application d'une stratégie de coupure[75].....	35
Figure 24 Degrés-heures d'inconfort lors du mois de janvier avec une température de consigne de 20°C.	40
Figure 25 Degrés-heures d'inconfort lors du mois de janvier avec une température de consigne de 21°C	41
Figure 26 Nombre de jours avec plus de 2h en inconfort lors de l'occupation avec une consigne à 20°C	42
Figure 27 Nombre de jours avec plus de 2h en inconfort lors de l'occupation avec une consigne à 21°C	42
Figure 28 Temps de relance pour le jour le plus froid le 15 janvier.....	43
Figure 29 Temps de relance pour un jour à température extérieure moyenne le 29 janvier	44
Figure 30 Nombre d'occurrences où la relance était trop lente (plus de deux heures)	44
Figure 31 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier. Comparaison des différents niveaux d'isolation.....	47
Figure 32 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure un jour moyen : le 29 janvier. Comparaison des différents niveaux d'isolation.....	49

Figure 33 Évolution de la température opérative des 4 scénarios de coupure pour un cas moyen d'isolation (6 cm et double vitrage). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier.....	50
Figure 34 Évolution de la température opérative avec 6 variantes d'infiltration pour un cas moyen d'isolation (6 cm et double vitrage). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier.....	51
Figure 35 Degrés-heures d'inconfort observés dans les différents scénarios de coupure et de niveaux d'isolation	54
Figure 36 Degrés-heures d'inconfort observés pour différents taux d'infiltration. Scénario1 (coupure de 2 heures, gains complets). Cas d'isolation moyen (6 cm et double vitrage).....	54
Figure 37 Impact énergétique moyen des différents scénarios et niveaux d'isolation pour la période étudiée [kWh].....	57
Figure 38 La surconsommation moyenne pour les différents scénarios et niveaux d'isolation pour la période étudiée [kWh].	58
Figure 39 Recouvrement moyen pour les différents scénarios et niveaux d'isolation pour la période étudiée [%].	61
Figure 40 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier. Comparaison des différents types de ventilation.	62
Figure 41 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure un jour moyen : le 29 janvier. Comparaison des différents types de ventilation.	63
Figure 42 Évolution de la température opérative des 4 scénarios de coupure pour le cas ventilé sans récupération de chaleur. Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier	64
Figure 43 Évolution de la température opérative des 4 scénarios de coupure pour le cas ventilé avec récupération de chaleur. Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier	65
Figure 44 Degrés-heures d'inconfort observés dans les différents scénarios de coupure et type de ventilation.	67
Figure 45 Impact énergétique moyen des différents scénarios et variantes de ventilation.	69
Figure 46 Surconsommation moyenne des différents scénarios et des types de ventilation.	70
Figure 47 Recouvrement moyen des différents scénarios et des types de ventilation.....	71
Figure 48 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier. Comparaison d'un cas de référence sans chape au plancher de l'étage (isolation 6 cm et double vitrage) avec deux cas d'épaisseurs de chapes différentes (5 et 8 cm).....	72
Figure 49 Degrés-heures d'inconfort observés dans les différents scénarios de coupure et de masse thermique du bâtiment.....	73
Figure 50 Impact énergétique moyen des différents scénarios et masses thermiques du bâtiment. .	74
Figure 51 Surconsommation moyenne des différents scénarios et masses thermiques du bâtiment.	75
Figure 52 Recouvrement moyen des différents scénarios et masses thermiques du bâtiment.	76
Figure 53 Combinaison des taux de recouvrement avec les degrés-heures pour l'ensemble des variantes d'isolation, de ventilation et de d'interie thermique pour le premier scénario de coupure.	77
Figure 54 Combinaison des taux de recouvrement avec les degrés-heures pour l'ensemble des scénarios de coupure. Les variantes d'isolation ont été limitées au cas de 6 cm d'isolant avec double vitrage. Les variantes de masse thermique ont été limitées au cas de la chape de 8 cm.	78
Figure 55 Circulation d'air entre les pièces ([m ³ /h]) au rez-de-chaussée. Flèches bleues pour l'air pulsé, flèches rouges pour l'air extrait, flèches vertes pour une circulation entre 2 pièces.	93

Figure 56 Circulation d'air entre les pièces ([m³/h]) au rez-de-chaussée. Flèches bleues pour l'air pulsé, flèches rouges pour l'air extrait, flèches vertes pour une circulation entre 2 pièces. 93

Liste des tableaux

Tableau 1 Caractéristiques des réseaux traditionnels et des réseaux intelligents.[14].....	5
Tableau 2 Capacité, diffusivité et effusivité thermique de différents matériaux [19].....	10
Tableau 3 Valeurs typiques de constantes de temps de bâtiments selon les matériaux utilisés. [42].	10
Tableau 4 Comparaison des différents modes de stockage de chaleur.[37]	13
Tableau 5 Bâtiments érigés en Région wallonne classés selon leur typologie et leur année de construction, d'après[52]	19
Tableau 6 Réflexion sur le potentiel et limites de flexibilité des bâtiments anciens ou neufs	22
Tableau 7 Caractéristiques des parois du bâtiment.....	24
Tableau 8 Caractéristiques des pièces du bâtiment	25
Tableau 9 Caractéristiques des conditions météorologiques durant le mois de janvier	29
Tableau 10 Contraintes à respecter dans l'analyse des paramètres de chauffe.....	31
Tableau 11 Scénarios étudiés pour l'analyse des paramètres de chauffe	32
Tableau 12 Les 4 scénarios retenus pour l'étude faisant varier la durée de la coupure, le taux d'occupation du bâtiment et appliquant une période de préchauffe à une consigne de température plus élevée avant la coupure.....	34
Tableau 13 Températures consignes et contraintes retenues pour le paramétrage des simulations et du calcul des indicateurs.	35
Tableau 14 Propriétés des isolants utilisés. Valeurs issues de la bibliothèque de matériaux TRNSYS de l'équipe BEMS/ULg	36
Tableau 15 Variantes des sept niveaux d'isolation. Coefficients de transmission thermique des différentes parois isolées. Coefficient de transmission thermique U et facteur solaire G du vitrage. Valeurs reprises du logiciel TRNSYS.	36
Tableau 16 Taux d'infiltration moyen (n_{sb}) appliqués en fonction du niveau d'isolation du bâtiment	37
Tableau 17 Évaluation de l'influence du taux d'infiltration sur un cas moyen d'isolation.....	37
Tableau 18 Variantes de ventilation.....	38
Tableau 19 Composition du plancher rénové avec 2 épaisseurs de chape différentes.....	39
Tableau 20 Variantes de la masse thermique	39
Tableau 21 Paramètres et contraintes de chauffe retenus	45
Tableau 22 Chutes de température moyennes durant la coupure pour les différents cas d'isolation le 15 janvier. (*) Moyenne calculée sur 45 min pour le cas non-isolé, qui correspond au temps pour atteindre la température minimale.	48
Tableau 23 Chutes de température moyennes durant la coupure pour les différents cas d'isolation le 29 janvier. (*)Moyenne calculée sur 1h pour le cas non-isolé, qui correspond au temps pour atteindre la température minimale.	49
Tableau 24 Valeurs moyennes (et écarts-types), minimales et maximales des temps sans inconfort lors de la coupure pour les variantes d'isolation. Chiffres pour une température limite de confort à 19°C et à 20°C.....	52
Tableau 25 Besoins du bâtiment en fonction de son niveau d'isolation. Consommation annuelle, consommation annuelle tenant compte des gains internes et consommation quotidienne moyenne durant la période étudiée.	56
Tableau 26 Hausse de la surconsommation entre les scénarios 1 et 2.	58
Tableau 27 Température avant la relance des scénarios 1 et 2 le 15 janvier de 3 niveaux d'isolation.	59
Tableau 28 Surconsommations moyennes durant l'heure de préchauffe à la température de consigne à 22°C pour les différents niveaux d'isolation.....	59

Tableau 29 Chutes de température moyennes durant la coupure pour les différents cas de ventilation le 15 janvier. (*) Moyenne calculée sur 45 min pour le cas ventilé sans récupération de chaleur, qui correspond au temps pour atteindre la température minimale.....	63
Tableau 30 Chutes de température moyennes durant la coupure pour les différents cas de ventilation le 29 janvier.	63
Tableau 31 Valeurs moyennes (et écarts-types), minimales et maximales des temps sans inconfort lors de la coupure pour les variantes de ventilation. Chiffres pour une température limite de confort à 19°C et à 20°C.	66
Tableau 32 Besoins du bâtiment en fonction de son niveau type de ventilation. Consommation annuelle, consommation annuelle tenant compte des gains internes et consommation quotidienne moyenne durant la période étudiée.	68
Tableau 33 Surconsommation moyenne durant l'heure de préchauffe à la température de consigne de 22°C pour les différents types de ventilation.....	70
Tableau 34 Valeurs moyennes (et écarts-types), minimales et maximales des temps sans inconfort lors de la coupure pour les différents scénarios et masses thermiques du bâtiment. Chiffres pour une température limite de confort à 19°C et à 20°C.	73
Tableau 35 Besoins du bâtiment en fonction de sa masse thermique. Consommation annuelle, consommation annuelle tenant compte des gains internes et consommation quotidienne moyenne durant la période étudiée.	74
Tableau 36 Profil de gains : occupation du bâtiment.....	89
Tableau 37 Profil de gains : éclairage.....	89
Tableau 38 Profil de gains : appareils électriques.....	89
Tableau 39 Profil des consignes de température.....	89
Tableau 40 Dimensionnement de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour 7 niveaux d'isolation différents. Température de consigne de 21°C. (*) TV = Triple vitrage.....	90
Tableau 41 Dimensionnement de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour un niveau d'isolation de 6 cm avec double vitrage pour 6 taux d'infiltration différents. Température de consigne de 21°C.	90
Tableau 42. Surpuissance nécessaire à la relance sur base des facteurs de relance de la source [86]. Puissance tenant compte de la surface des pièces et calculée pour une relance en 2 heures maximum, avec 1,2 ou 3 K de chute de température lors du ralenti.	91
Tableau 43 Dimensionnement total de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour 7 niveaux d'isolation différents. Température de consigne de 21°C. (*) TV = Triple vitrage.....	91
Tableau 44 Dimensionnement total de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour un niveau d'isolation de 6 cm avec double vitrage pour 6 taux d'infiltration différents. Température de consigne de 21°C.	91
Tableau 45 Extrait de la norme D50-001 et les débits nominaux aux diverses pièces dans le résidentiel [80].	92
Tableau 46 Calcul des débits de ventilation selon la norme D50-001. Débits équilibrés entre la pulsion et l'extraction.	92
Tableau 47 Dimensionnement de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour les différents types de ventilation. Température de consigne de 21°C.	93
Tableau 48 Surpuissance nécessaire à la relance sur base des facteurs de relance de la source [71]. Puissance tenant compte de la surface des pièces et calculée pour une relance en 2 heures maximum, avec 1,2 ou 3 K de chute de température lors du ralenti.	94

Tableau 49 Dimensionnement total de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour les différents types de ventilation. Température de consigne de 21°C.....	94
Tableau 50 Liste des scénarios testés non retenus.....	101

Liste des équations

Équation 1 Chaleur sensible accumulée dans un matériau pour une différence de température donnée. Avec Q_{12} pour la chaleur sensible accumulée [J], m la masse [kg], C_p la chaleur spécifique [J/kg K] et T_1 et T_2 les températures initiale et finale [K] [36].	8
Équation 2 Chaleur sensible accumulée dans un matériau pour une différence de température donnée. Équation simplifiée avec la chaleur spécifique constante. Avec Q_{12} pour la chaleur sensible accumulée [J], m pour la masse [kg], C_p pour la chaleur spécifique [J/kg K], T_1 et T_2 pour les températures initiale et finale [K], V pour le volume [m^3], ρ pour la masse volumique [kg/m^3] [36].	8
Équation 3 Quantité d'énergie accumulée durant le changement de phase. Avec Q la quantité d'énergie accumulée [J], m la masse du matériau [kg] et λ la chaleur latente de fusion ou de vaporisation [J/kg]. [36][37]	12
Équation 4 Quantité d'énergie totale accumulée durant un procédé de stockage utilisant la chaleur latente partant d'une température T_1 à T_2 . Avec Q la quantité d'énergie accumulée durant l'ensemble du processus [J], T_1 et T_2 températures en début et de fin de procédé de stockage [K], C_{ps} et C_{pl} chaleurs spécifiques du matériau solide et liquide [J/kg K], m la masse du matériau [kg] et λ la chaleur latente de fusion [J/kg]. [36][37].	12
Équation 5 Équation schématisant le fonctionnement du stockage de chaleur thermochimique [37]	12
Équation 6 Définition du coefficient de performance (COP)	15

Liste des Abréviations

APPTS	Appartements
COP	Coefficient de performance
COP	Conference of the parties
Dh	Degrés-heures
DSM	Demand Side Management
DV	Double vitrage
E2H	Electricity-To-Heat
ECS	Eau chaude sanitaire
EnR	Énergies renouvelables
GES	Gaz à effet de serre
GR	La Grande Région
IE	Impact énergétique
MCP	Matériau à changement de phase
PAC	Pompe à chaleur
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PtH	Power to heat
PTH4GR ² ID	Power to heat for the Greater Region's Renewable Integration and Development
RW	Région wallonne
TV	Triple vitrage
VBA	Visual Basic for Applications
UE	Union européenne

Remerciements

Je tiens à remercier mon promoteur de mémoire, le Professeur Philippe André, qui m'a permis de rejoindre l'unité de recherche BEMS afin d'y effectuer un stage sur le projet PTH4GR²ID et de m'avoir donné l'opportunité de réaliser mon mémoire sur ce sujet.

Je remercie également l'ensemble de l'unité de recherche BEMS pour leur accueil au sein de leur équipe ainsi que pour leur aide précieuse dans la réalisation de ce travail. À ce titre, je tiens plus spécifiquement à remercier Pauline Abrahams pour son encadrement, ses conseils et sa disponibilité tout au long du stage et de la rédaction de mon mémoire.

Enfin, je remercie tout particulièrement mon épouse Laetitia et ma fille Caroline sans qui la reprise des études ainsi que la réalisation de ce travail n'auraient pas été possibles. Merci pour votre aide, vos encouragements et votre patience.

Introduction

En ce début de 21^e siècle, les enjeux énergétiques et climatiques mondiaux, et plus particulièrement en Union européenne (UE), sont nombreux. En 2014, la consommation en énergie primaire de l'UE (UE28) s'élevait à 1507 Mtep, dont en moyenne 70,1 % d'énergies fossiles, contre 15% de nucléaire et 13,4% d'énergie d'origine renouvelable [1]. Le taux de dépendance énergétique se situait à 53,4% [2]. Outre ces consommations énergétiques importantes et une forte dépendance à l'importation, la déplétion annoncée des ressources fossiles est une pression supplémentaire au niveau de la politique énergétique européenne. Toujours en 2014, le nombre d'années de production restantes de pétrole, de gaz et de charbon, à rythme égal, était respectivement estimé à 49, 51, et 152 ans [3]. Malgré une raréfaction des ressources, une hausse de consommation énergétique mondiale estimée de l'ordre d'un tiers entre 2010 et 2035 est attendue, notamment due à une croissance de la demande dans des pays tels que la Chine ou l'Inde [4][5]. Enfin, le changement climatique, lié entre autres à la combustion d'énergies fossiles, pousse la communauté internationale à prendre des décisions afin de tenter d'enrayer ce dernier. À titre d'exemple, après la COP21 à Paris en 2015, 195 pays ont opté pour un accord dans lequel ils s'engagent à limiter la hausse de la température mondiale en-dessous de 2°C d'ici la fin du siècle [6].

Consciente des différents défis tant en termes d'approvisionnement et d'indépendance énergétique qu'environnementaux, l'UE s'est fixée des objectifs énergétiques et climatiques conséquents à court, moyen et long terme à travers notamment le « paquet sur le climat et l'énergie 2020 » [7], le « cadre pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030 » [8] et la « feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050 » [9]. Citons notamment parmi ces objectifs :

- À l'horizon 2020 : diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) de 20% (par rapport à 1990), avoir une part de 20% d'énergies renouvelables et augmenter l'efficacité énergétique de 20%[7].
- À l'horizon 2030 : diminuer les émissions des GES de 40% au moins (par rapport à 1990), avoir une part de 27% d'énergies renouvelables et augmenter l'efficacité énergétique de 27%[8].
- À l'horizon 2050, réduire de 80 à 85% les émissions de GES (par rapport à 1990) [10].

L'augmentation sensible de la part du renouvelable n'est pas sans conséquence sur les réseaux électriques, particulièrement sur la gestion de l'équilibre de ces derniers. Par équilibre, il faut entendre que la production d'électricité fournie sur le réseau doit être égale à tout moment à la quantité d'électricité consommée par les utilisateurs, au risque d'avoir des répercussions sur la qualité de l'électricité, notamment sur la fréquence, ou de provoquer des pannes voire un black-out dans les cas plus extrêmes. Or, la production d'électricité produite par des énergies renouvelables telles que les panneaux photovoltaïques et l'éolien dépend des conditions météorologiques et/ou de la période de la journée. Cette production a par conséquent un caractère imprévisible et/ou intermittent, et surtout, ne correspond pas forcément à une demande. [11][12]

Il est donc crucial de faire évoluer les réseaux électriques afin de faciliter l'intégration des énergies renouvelables et de rendre plus flexibles la production ainsi que la consommation dans le but de rendre moins complexe la gestion de l'équilibre. Une des solutions qui se développe fortement sont les technologies *Smart Grids* (ou réseaux intelligents). Le Centre commun de recherche avait inventorié pas moins de 459 projets en 2014 liés à ces réseaux intelligents [13]. Ces derniers tentent de répondre

aux diverses problématiques de gestion de l'équilibre par la mise en place d'un monitoring poussé et de divers concepts tels que la gestion de la demande (ou *Demand Side Management* – DSM)[14][15].

À un niveau plus régional, La Grande Région (coopération territoriale entre la Wallonie, la Lorraine, le Grand-Duché du Luxembourg, la Sarre et la Rhénanie-Palatinat) s'est elle-même fixé un objectif de production d'énergies renouvelables s'élevant à 15,2% à l'horizon 2023[16], mais qui aujourd'hui révèle une forte disparité au niveau de l'intégration de ces dernières entre les régions (Wallonie 13%, Allemagne 35%, France 23% et Luxembourg 11%). Son ambition d'intégrer des plus hauts taux d'EnR fait face à la même problématique que celle citée dans les paragraphes précédents : une production provenant de l'éolien et du photovoltaïque qui n'est pas toujours en adéquation avec la demande. Dans ce contexte, le projet PTH4GR²ID (pour Power to heat for the Greater Region's Renewable Intergration and Development), financé par le programme européen Interreg, étudie la réorganisation future du marché de l'électricité de la Grande Région en analysant une solution d'équilibrage entre la production d'électricité et sa consommation à travers la gestion de la demande par le contrôle de pompes à chaleur (PAC) et de moyens de stockages thermiques. Autrement dit, l'électricité fournie par les EnR lors de pics de production serait stockée sous forme de chaleur dans les bâtiments résidentiels par l'utilisation de pompes à chaleur contrôlées de façon intelligente. Cette conversion de l'énergie électrique, produite en excès par les EnR en chaleur et son stockage subséquent est le principe même du concept de *Power to heat* (PtH).[17][18][19]

Le projet PTH4GR²ID, débutant fin de l'année 2016 et mené par un consortium de différents partenaires (dont l'équipe BEMS de l'Université de Liège), se subdivise en 4 phases (Identification de la situation actuelle, développement de la solution, les tests et les recommandations) et 10 actions. Le présent mémoire s'inscrit dans la première phase du projet et plus particulièrement dans « l'action 4 » dont le but est d'évaluer le potentiel des bâtiments résidentiels dans leur contribution à la gestion du réseau de la GR.[18]

Le présent travail se concentre plus particulièrement sur l'étude de la flexibilité de la demande de chauffage d'un bâtiment résidentiel représentatif de la Région wallonne (RW). Nous étudierons son comportement thermique dans le cadre d'une gestion de coupure de son système de chauffe par simulation dynamique dans le logiciel TRNSYS, et ce afin d'évaluer le possible déplacement des charges de chauffage de ce bâtiment. Différentes stratégies de coupures sous différentes variantes d'enveloppe et de système seront analysées par le biais d'indicateurs énergétiques et de confort thermique. L'analyse aura pour but de mettre en évidence l'impact de ces stratégies de coupure sur le confort de l'occupant, l'impact énergétique au niveau du bâtiment et du réseau ainsi que l'impact économique lié à ces stratégies de coupure.

1 Etat des lieux

Après avoir situé l'objectif de ce mémoire dans son contexte et décrit le projet dans lequel il s'inscrit, nous allons, dans cette première partie, situer les réseaux électriques au regard de leurs problématiques actuelles ainsi que faire un état des lieux des différentes composantes qui seront mobilisées dans l'évaluation du potentiel de stockage thermique dans le bâtiment à savoir les méthodes de stockage thermique, les pompes à chaleur et un aperçu du parc immobilier en Région wallonne.

1.1 Des réseaux électriques traditionnels au concept de *Power-to-Heat* (PtH)

1.1.1 Les réseaux électriques traditionnels et leurs problématiques

Pour faire face à la constante augmentation de la demande en électricité, les réseaux électriques ont continuellement été renforcés et améliorés tout au long de leur histoire. Historiquement, ces réseaux ont été conçus pour travailler avec de grosses centrales fonctionnant principalement aux énergies fossiles ou nucléaires [20]. L'électricité produite par ces centrales est acheminée vers les zones de consommation par un réseau de transport à haute et à très haute tension (entre 50 et 400 kV). Elle est ensuite distribuée aux consommateurs par le biais d'un réseau de distribution à moyenne et basse tension (entre 110 V et 50 kV)[21][22] (voir figure 1). L'électricité y est donc véhiculée dans un seul sens d'une production dite « centralisée » vers le consommateur [23] et ce mode de fonctionnement est resté très stable durant le 20^e siècle [22].

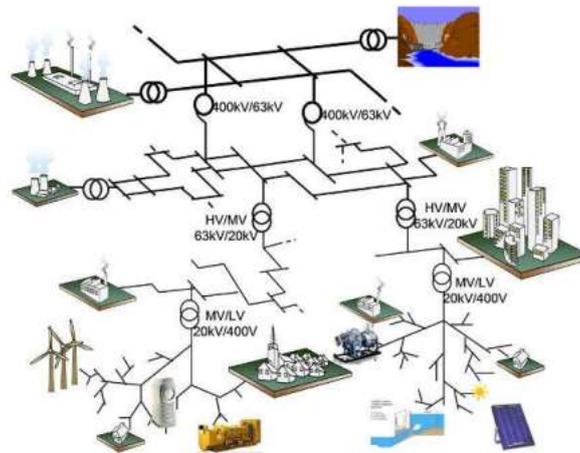


Figure 1 Structure du réseau électrique "traditionnel" [22]

Les réseaux électriques sont soumis à plusieurs contraintes dans le but d'éviter des pannes ou encore des blackouts. Tout d'abord, à tout moment la production d'électricité doit être égale à la consommation. Or la consommation peut varier fortement au cours d'une journée (ou d'une saison à l'autre) et atteindre ce que l'on appelle des « pics de consommation ». Les réseaux doivent par conséquent être surdimensionnés afin d'assurer l'approvisionnement durant ces pics. [24] Ensuite, afin de préserver la stabilité des réseaux, ces derniers doivent également pouvoir garantir une certaine qualité de l'énergie, notamment en termes de tension.[25]. Or, comme nous l'avons déjà évoqué dans la section introductive, la hausse de la demande et la transition énergétique mettent les réseaux sous pression. L'introduction conséquente d'énergies renouvelables telles que l'éolien ou le photovoltaïque rend la production en partie intermittente et/ou imprévisible et cela de façon « décentralisée » ; l'électricité pouvant être injectée à différents points du réseau (p.ex. sur le réseau de distribution) et

par conséquent pouvant circuler de façon bidirectionnelle. En outre, nous avons pu voir apparaître ces dernières années de nouvelles utilisations de l'électricité (p.ex. les véhicules électriques ou appareils technologiques tels que les *smartphones*) rendant la demande plus fluctuante [26]. Ces différentes considérations rendent la gestion des réseaux électriques plus complexe. Les réseaux, tels que conçus jusqu'à présent, n'auraient pas les capacités de faire face aux demandes futures selon [27] et nécessitent donc d'être rénovés afin de pouvoir intégrer une part plus importante d'énergies renouvelables et de gérer plus efficacement la production intermittente d'électricité ainsi que les pics de consommation. [11][12]

L'exemple de l'Allemagne est particulièrement évocateur afin d'illustrer cette problématique. En 2010, ce pays a adopté une politique énergétique contraignante (*l'Energie Konzept 2050*) ayant pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 80% par rapport à 1990, de produire 60% de son énergie finale et 80% de son électricité par des EnR et enfin de diminuer sa consommation globale à l'horizon 2050. De plus, après l'accident nucléaire de Fukushima en 2011, l'Allemagne a décidé de précipiter sa sortie du nucléaire. Elle décide notamment de fermer dès cette année-là 7 de ses centrales nucléaires les plus anciennes et de fermer les 9 restantes d'ici 2022. Le pays ayant à ce moment-là un mix énergétique composé de 25% de nucléaire, devra se passer d'une capacité de production de 8.3 GW. L'Allemagne dispose néanmoins de réserves de production importantes (147 GW, pour une demande de pointe en 2009 de 80 GW), ces dernières sont principalement constituées de centrales au charbon et au mazout. Si cette perte de capacité sera compensée en utilisant une partie de ces centrales polluantes ou en important de l'électricité, le but de l'Allemagne est de la remplacer par des énergies propres en intégrant, dès 2020, 35% d'EnR (contre 20% en 2011). [28]

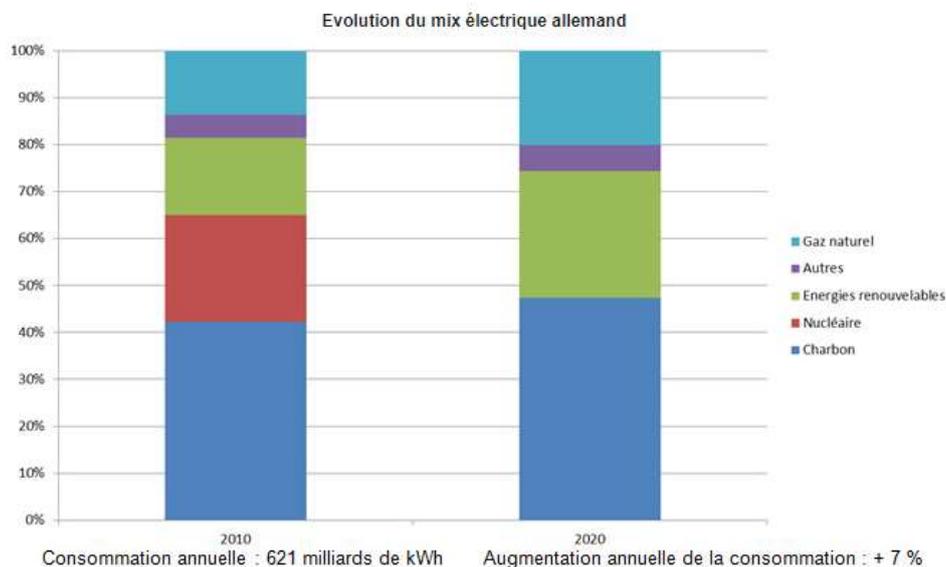


Figure 2 Évolution du mix énergétique allemand[28]

L'évolution rapide du mix énergétique (voir figure 2) a pourtant un impact important sur les réseaux électriques allemands. Dans ce pays, les unités de production d'électricité par des EnR (p.ex. parcs éoliens offshore) se fait principalement au Nord du pays alors que les centrales thermiques se trouvent plus généralement au Sud construites historiquement près des unités de consommation. Cette répartition particulière des installations électriques a pour conséquence que le dimensionnement du réseau n'est pas capable d'assurer le transport de l'électricité du Nord vers le Sud en cas de forte

production d'électricité d'origine renouvelable. De par ce fait, de nombreux arrêts d'éoliennes ont été recensés durant les dernières années mettant le pays dans la situation paradoxale de devoir importer de l'électricité auprès de pays voisins. Si l'Allemagne investit dans le renforcement de son réseau en installant de nouvelles lignes électriques, elle doit néanmoins trouver des solutions pour contrebalancer les effets de l'intermittence de la production d'électricité d'origine renouvelable. Il lui faut également pouvoir la consommer quand elle est disponible. Pour cela le pays se concentre sur 2 axes de solutions. Premièrement le développement de solutions de stockage de l'énergie par divers procédés et technologies tels que le *Power-to-Gas* (stockage sous forme d'hydrogène), le *Power-To-Heat* (stockage sous forme de chaleur), le stockage par batterie et le stockage par air comprimé. Deuxièmement, la mise en place de solutions de gestion de la demande incitant par exemple les consommateurs à consommer l'électricité produite par des EnR quand elle est disponible. Plusieurs de ces solutions seront discutées dans les sections suivantes [28]

1.1.2 Solutions apportées par les Smart Grids

De par les problématiques évoquées dans la section précédente, nous pouvons faire le constat que les réseaux électriques nécessitent plus de flexibilité au niveau de la production mais également de la demande afin de faire concorder ces dernières à tout moment. Les solutions *Smart Grids*, ou réseaux intelligents, sont un ensemble de concepts tentant de répondre à ces enjeux. Il existe différentes définitions de ce qu'est un *Smart Grid*. La plateforme technologique européenne sur les *Smart Grids* le définit comme suit : « Un *Smart Grid* est un système électrique capable d'intégrer de manière intelligente les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs afin de maintenir une fourniture d'électricité efficace, durable, économique et sécurisée » [29]. Si cette définition est très large, on peut considérer un réseau comme étant « intelligent » quand celui-ci intègre des technologies lui permettant d'être communicant de façon bidirectionnelle entre les différents acteurs du réseau, notamment le consommateur, et lui permettant ainsi de gérer plus facilement l'électricité transportée et distribuée sur le réseau et d'assurer l'équilibre sur celui-ci [24][14]. Le tableau 1 nous montre quelques différences entre les caractéristiques des réseaux traditionnels et des réseaux intelligents.

Caractéristiques des réseaux électriques actuels	Caractéristiques des réseaux électriques intelligents
Analogique	Numérique
Unidirectionnel	Bidirectionnel
Production centralisée	Production décentralisée
Communicant sur une partie des réseaux	Communicant sur l'ensemble des réseaux
Gestion de l'équilibre du système électrique par l'offre/production	Gestion de l'équilibre du système électrique par la demande/consommation
Consommateur	Consom'acteur

Tableau 1 Caractéristiques des réseaux traditionnels et des réseaux intelligents.[14]

Parmi les solutions d'équilibrage du réseau mises en œuvre par les *Smart Grids*, le consommateur devient un acteur incontournable avec la gestion de la demande ou *Demand Side Management* (DSM). Cette dernière peut être définie selon P. Warren [30] de la manière suivante : « La gestion de la demande se réfère à des technologies, des actions et des programmes du côté du consommateur d'énergie qui cherchent à gérer ou à réduire la consommation d'énergie, afin de réduire les dépenses

totales du système d'énergie ou de contribuer à la réalisation d'objectifs politiques tels que la réduction des émissions ou l'équilibrage de l'offre et la demande. ». Ceci peut entre autres être réalisé par le biais de tarifications spécifiques ou d'incitants financiers ou encore par le pilotage de certains appareils électriques du consommateur [31]. Si l'objectif de la DSM est multiple, elle vise particulièrement à avoir une flexibilité accrue du côté du consommateur que nous appellerons la flexibilité de la demande. Elle est définie comme étant la capacité d'un consommateur à adapter sa consommation en électricité suite à un signal (p.ex. un signal de prix) qui lui est envoyé [26].

La flexibilité de la demande se concrétise principalement par deux stratégies de modulation des charges. La modulation à la baisse, que l'on appelle également « effacement », a pour but de diminuer provisoirement, de reporter ou voire de se passer de certaines consommations auprès des consommateurs. La modulation à la hausse *a contrario* vise à momentanément augmenter ou à anticiper certaines sollicitations. De manière générale, ces deux stratégies de modulation visent à ne pas augmenter la consommation globale. L'écrêtage des pics (ou lissage de la pointe) permettant de diminuer l'ampleur du pic de consommation ou le remplissage de creux permettant de consommer le surplus d'électricité produite sont deux exemples d'application de la flexibilité de la demande au niveau du réseau électrique (voir figure 3). [26]

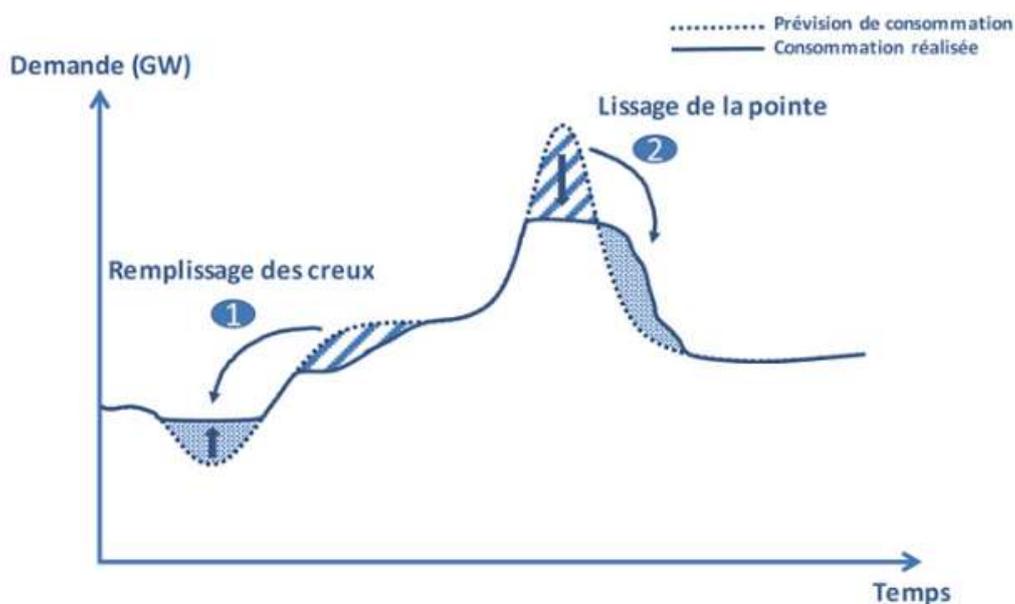


Figure 3 Exemple d'application de la flexibilité de la demande illustré par un profil de charge. [26]

1.1.3 Le concept de *Power-To-Heat*

Le développement des systèmes de stockage de l'énergie constitue un autre enjeu majeur des réseaux intelligents permettant de rendre plus flexible la gestion de l'état du système électrique. Si l'électricité ne se stocke pas telle quelle, il existe aujourd'hui de nombreuses solutions permettant de la stocker sous une autre forme d'énergie. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), le stockage d'énergie par air comprimé, le stockage sous forme d'hydrogène ou les batteries en sont quelques exemples. [32] La mise en place de technologies de stockages a de nombreux avantages notamment en facilitant l'équilibre sur le réseau, en lissant la production d'énergies intermittentes ou encore en diminuant certains investissements tels que des centrales de pointe [33]. Néanmoins de nombreuses

solutions de stockage se révèlent être des investissements très importants ou n'ont pas encore un degré de maturité satisfaisant [32].

Les systèmes de stockage évoqués dans le paragraphe précédent ont tous pour but ultime de restituer de l'électricité. L'importance d'accroître la flexibilité sur les réseaux électriques pousse les opérateurs à prospecter des moyens de stockage sous d'autres formes d'énergies ou au travers de secteurs énergétiques différents (p.ex. le secteur du gaz). Nous parlons dès lors de *Power-To-X* et de *Smart Grids* « multi-énergies ». [29][28][34] Selon [34] nous pouvons définir le *Power-To-X* comme étant « l'ensemble des technologies permettant de découpler l'énergie électrique du secteur de l'électricité pour être utilisée par d'autres secteurs » énergétiques. Ce stockage « intersectoriel » peut être illustré par la figure 4. Le « X » de *Power-To-X* représente le médium de stockage (et par extension le secteur stockant l'énergie) qui peut être par exemple du gaz (hydrogène ou méthane), du combustible liquide ou encore de la chaleur ; nous parlons dès lors respectivement de *Power-To-Gas*, *Power-To-Fuel* ou encore de *Power-To-Heat* [35]. Le procédé du *Power-To-Heat*, qui nous concerne plus particulièrement, produit généralement de la chaleur par le biais de pompes à chaleur afin de la stocker pour alimenter les besoins de chauffage d'un bâtiment ou d'un réseau de chaleur [28].

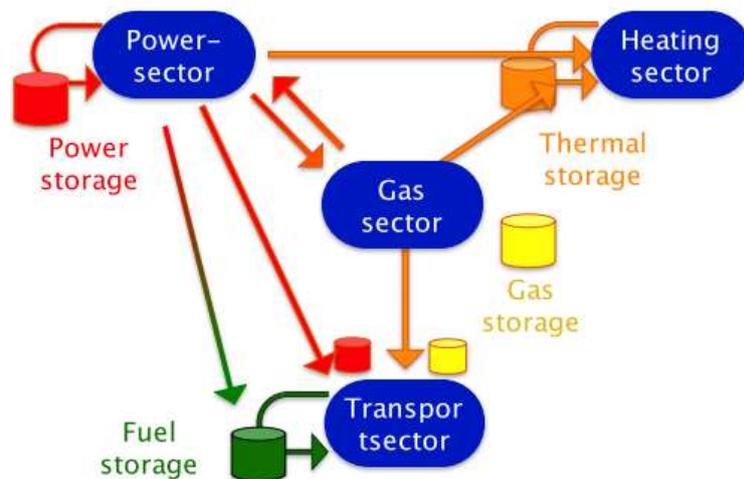


Figure 4 Stockage énergétique "intersectoriel". [35]

1.2 Les techniques de stockage thermique appliquées au résidentiel

Dans cette section, nous allons parcourir différents modes de stockage d'énergie. Toutefois, étant dans le cadre d'un projet PtH, nous allons nous limiter à parcourir des modes de stockage thermique. Nous commencerons par les modes de stockage les plus habituellement rencontrés dans le domaine du bâtiment qui sont le stockage de chaleur sensible dans l'enveloppe du bâtiment et dans un accumulateur d'eau chaude. Nous évoquerons par la suite deux méthodes de stockages thermiques qui émergent dans le domaine de la recherche qui sont le stockage de chaleur latente dans des matériaux à changement de phase et le stockage thermo-chimique.

1.2.1 Le stockage de chaleur sensible

Thermodynamiquement parlant, le stockage de chaleur sensible dans un matériau permet d'augmenter l'énergie contenue dans ce dernier en augmentant sa température. L'énergie ainsi accumulée par le matériau en fonction de la différence de température peut être calculée avec l'équation 1. Cette équation peut être simplifiée si nous considérons la chaleur spécifique comme étant constante avec l'équation 2. [36][37]

$$Q_{12} = \int_{T_1}^{T_2} m C_p(T) dT$$

Équation 1 Chaleur sensible accumulée dans un matériau pour une différence de température donnée. Avec Q_{12} pour la chaleur sensible accumulée [J], m la masse [kg], C_p la chaleur spécifique [J/kg K] et T_1 et T_2 les températures initiale et finale [K] [36].

$$Q_{12} = mC_p(T_2 - T_1) = \rho VC_p(T_2 - T_1)$$

Équation 2 Chaleur sensible accumulée dans un matériau pour une différence de température donnée. Équation simplifiée avec la chaleur spécifique constante. Avec Q_{12} pour la chaleur sensible accumulée [J], m pour la masse [kg], C_p pour la chaleur spécifique [J/kg K], T_1 et T_2 pour les températures initiale et finale [K], V pour le volume [m^3], ρ pour la masse volumique [kg/m^3] [36]

De par les 2 équations ci-dessus, nous remarquons qu'à masse et différence de température égales, la quantité de chaleur qui pourra être transférée au matériau dépendra directement de sa chaleur spécifique. De même si nous considérons cette fois-ci le volume du matériau, nous constatons que, outre la chaleur spécifique, la quantité de chaleur que l'on pourra y stocker dépendra également de la masse volumique du matériau. C'est le produit de ces deux propriétés qui permet de déterminer la quantité maximale de chaleur sensible pour un volume donné. Pour cette raison, et étant donné que le volume et la masse des matériaux de stockage sont souvent des paramètres contraignants, les matériaux choisis pour le stockage thermique auront des chaleurs spécifiques et des masses volumiques importantes. Toutefois, et dépendant du type d'application, d'autres propriétés du matériau ou paramètres devront être considérés tels que les niveaux de températures souhaités, la conductivité thermique du médium, le coût, etc. [36][37]

Les matériaux utilisés pour le stockage de chaleur sensible sont soit liquides ou soit solides. L'utilisation de l'eau est très répandue dans les applications résidentielles. Si elle a des caractéristiques thermiques intéressantes (haute chaleur spécifique de 4.19 kJ/kg K), elle peut néanmoins être corrosive, compliquée à stratifier et ne travaille que dans des gammes de températures faibles. Pour des applications industrielles à haute température, l'huile et les sels fondus seront préférés. Les solides

comme le béton, la roche ou le sol peuvent également être de bons candidats pour faire du stockage résidentiel. [36]

Enfin, la durée du stockage est un élément important dans la caractérisation du moyen de stockage. Nous pouvons ainsi distinguer des stockages de court terme (stockage quotidien ou pour plusieurs jours) des stockages inter-saisonniers (plusieurs mois). Au niveau résidentiel, si les premiers peuvent être implémentés par des ballons d'eau chaude, les seconds ont besoin d'installations bien plus importantes. Elles peuvent être réalisées soit au moyen d'importants réservoirs de stockages enfouis dans le sol (TTES, Tank Thermal Energy Storage), soit par l'exploitation de nappes aquifères (ATES, Aquifer Thermal Energy Storage) ou encore par l'exploitation des sous-sols au moyen de sondes géothermiques (BTES, Borehole Thermal Energy Storage). [36]

1.2.2 Le stockage de chaleur dans la masse thermique du bâtiment

Le stockage de chaleur dans la masse thermique du bâtiment est un cas particulier du stockage de la chaleur sensible que nous venons d'aborder dans la section précédente. Le projet PTH4GRI²D s'intéressant à ce mode de stockage, nous passerons en revue les différentes notions y afférant. Par « masse thermique » d'un bâtiment il faut entendre la totalité de la masse des constituants de ce dernier ayant la capacité de stocker de l'énergie thermique. Cela peut être aussi bien la masse de ses parois internes que celle de l'ameublement ou encore de l'air intérieur.[38]. À cette masse thermique est associée la notion d'inertie thermique du bâtiment. S'il existe de nombreuses définitions de l'inertie thermique, elle peut être définie comme étant la capacité d'un bâtiment à stocker de l'énergie thermique et à pouvoir la restituer au fur et à mesure [38][39][40]. Cette capacité est fonction de la masse thermique du bâtiment ainsi que la surface d'échange entre cette masse et l'air intérieur[40]. L'inertie d'un bâtiment permet donc d'atténuer les changements de température intérieure par rapport à la température extérieure en stockant de la chaleur lorsque les gains y sont plus importants (p.ex. gains solaires) et en la déstockant avec un décalage dans le temps quand les déperditions y sont plus conséquentes (p.ex. chute de température nocturne). Ce décalage est ce que nous appelons le déphasage thermique ; il est d'autant plus important que l'inertie du bâtiment est forte. [39][41]

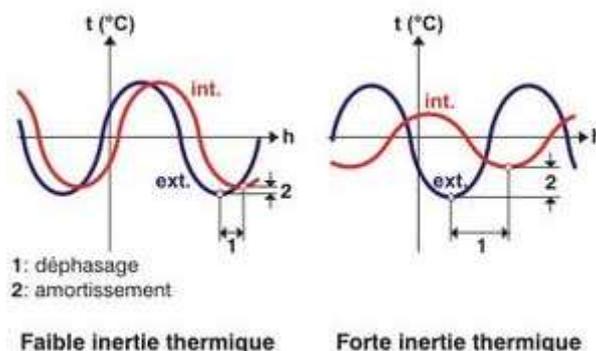


Figure 5 Illustration d'un déphasage thermique en fonction de l'inertie du bâtiment. [41]

L'inertie thermique d'un matériau homogène dépend principalement de 3 de ses propriétés : la masse volumique ρ [kg/m^3], la chaleur spécifique c [$\text{J}/\text{kg K}$] et la conductivité thermique λ [$\text{W}/\text{m K}$] [38]. Ces 3 propriétés nous permettent de définir les paramètres suivants :

- **La capacité thermique volumique** ($C_{\text{vol}} = c \rho$) est la quantité d'énergie qu'un matériau peut stocker par unité de volume [$\text{J}/\text{m}^3 \text{K}$]. [38]

- **L'effusivité** ($E_f = \sqrt{\rho c \lambda}$) permet de caractériser la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement pour une différence de température donnée [$J s^{-1/2} m^{-2} K$]. Autrement dit plus le matériau sera effusif, plus il pourra stocker de l'énergie en augmentant peu sa température. [38][39]
- **La diffusivité** ($D_f = \lambda / (\rho c)$) permet de caractériser la vitesse à laquelle la chaleur se propage dans un matériau par conductivité [$m^2/s K$]. Le déphasage thermique est d'autant plus grand que la diffusivité est faible. [38][39]

Afin d'augmenter l'inertie d'un bâtiment, nous choisissons des matériaux ayant une grande effusivité et une faible diffusivité. En outre, il faudra veiller à avoir la plus grande capacité thermique possible. Le tableau 2 reprend quelques valeurs typiques de ces paramètres pour différents matériaux. [39][41]

Caractéristiques thermiques de matériaux courants Ordres de grandeur			
Matériaux	Capacité Thermique KJ/m ³ .K	Diffusivité Thermique m ² /h	Effusivité Thermique J/(°C.m ² .s ^{1/2})
Béton de granulats	~ 2 200	~ 2.9 x 10 ⁻³	~ 2 000
Béton cellulaire	~ 600	~ 1.7 x 10 ⁻³	~ 400
Terre cuite	~ 1 700	~ 2.5 x 10 ⁻³	~ 1 400
Bois lourds	~ 1 600	~ 0.5 x 10 ⁻³	~ 600
Bois légers	~ 1 000	~ 0.4 x 10 ⁻³	~ 360
Acier	~ 3 500	~ 6.1 x 10 ⁻³	~ 14 000
Laine de cellulose	~ 40	~ 4 x 10 ⁻³	~ 40

Tableau 2 Capacité, diffusivité et effusivité thermique de différents matériaux [19].

Enfin, l'inertie d'un bâtiment peut également être caractérisée par sa constante de temps. Si elle peut être définie de plusieurs manières, une définition couramment retrouvée est que la constante de temps est égale au rapport entre la capacité thermique totale et le coefficient de déperditions du bâtiment ($\tau_{bat} = C_{tot} / H$) exprimé en [s]. [38][42]. D'après Roulet [42], un bâtiment ayant une forte inertie doit au moins avoir une constante de temps au-delà des 100 heures. Nous retrouvons quelques valeurs typiques de constantes de temps de bâtiments en fonction des matériaux utilisés dans le tableau 3.

Lourd, tout béton, isolation $U = 0,2 W/(m^2K)$	10 jours
Lourd, tout béton, isolation $U = 0,5 W/(m^2K)$	8 jours
Lourd, tout béton, façade simple vitrage	1 ¹ / ₂ jour
Idem, sol avec moquette et faux plafond, $U = 1 W/(m^2K)$	3 jours
Tout en bois massif, façade vitrée $U = 1 W/(m^2K)$	2 jours
Tout en bois mince (20 mm) $U = 1 W/(m^2K)$	1 jour
Serre horticole	8 heures

Tableau 3 Valeurs typiques de constantes de temps de bâtiments selon les matériaux utilisés. [42]

Outre les différents paramètres déjà évoqués dans les paragraphes précédents, l'inertie est également affectée de par la manière dont est effectuée l'isolation du bâtiment. La figure 6 illustre l'impact de l'isolation intérieure et extérieure sur l'inertie. Si l'isolation se fait par l'intérieur, par temps froid, le mur cède toute sa chaleur à l'environnement. Si la couche d'isolant arrête le froid, nous ne pouvons ni stocker, ni déstocker de la chaleur dans cette paroi. Au contraire, si l'isolation se fait par l'extérieur, le froid est directement arrêté par l'isolant et permet au mur de se charger ou de se décharger en chaleur du côté intérieur.[39][43] De même, l'inertie d'un bâtiment dépend de sa structure. Citons par exemple les bâtiments à ossature bois qui, de par leur structure légère, ont une faible capacité de stockage thermique.[39]

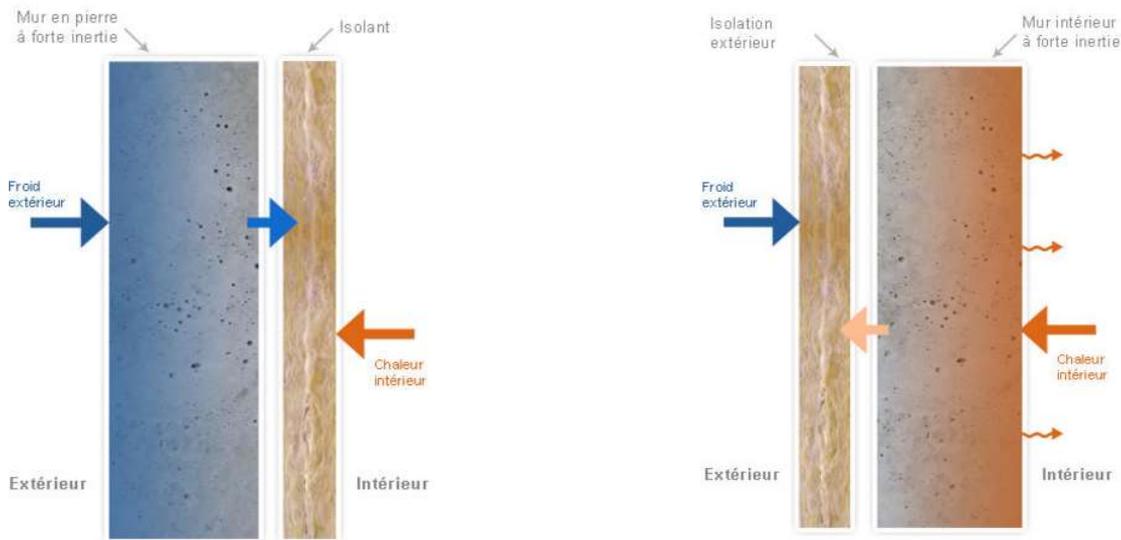


Figure 6 Inertie d'une paroi avec isolation intérieure (à gauche) et d'une paroi avec isolation extérieure (à droite). [43]

1.2.3 Le stockage par chaleur latente

Dans un procédé de stockage utilisant la chaleur latente (voir figure 7), l'énergie est principalement accumulée en réalisant un changement de phase isotherme d'un matériau. Le principal avantage de ce procédé est de pouvoir accumuler plus d'énergie au sein du matériau, et donc de réduire les volumes, tout en ayant que de faibles différences de températures sur l'ensemble du processus. [37]

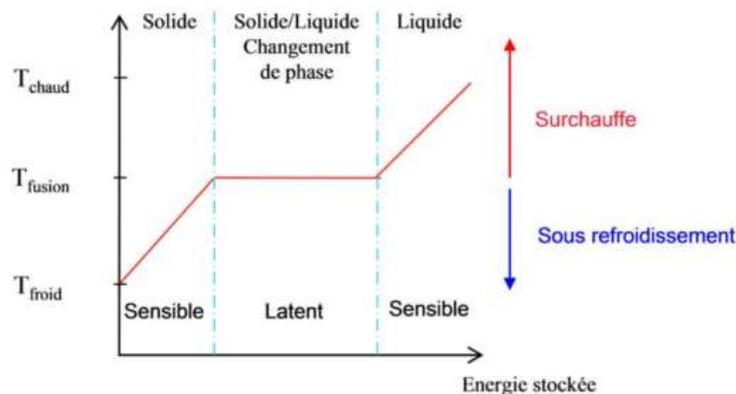


Figure 7 Évolution de la température en fonction de l'énergie stockée par chaleur latente.[37]

Nous appelons « matériaux à changement de phase » (MCP) les matériaux permettant de réaliser ce type de stockage. Généralement, afin de stocker de l'énergie thermique, ces matériaux vont réaliser une fusion, la vaporisation étant techniquement plus compliquée à mettre en œuvre. L'énergie accumulée dans le matériau de stockage durant le changement de phase est décrite par l'équation 3. Si nous reprenons l'exemple de la figure 7 illustrant la fusion d'un matériau par l'accumulation de chaleur, les températures de début et de fin ne sont pas égales à la température de fusion du matériau. Nous observons par conséquent une période de stockage de chaleur latente en milieu de processus et deux périodes de stockage de chaleur sensible en début et fin de procédé. Dans ce dernier cas, le calcul de l'énergie stockée dans le matériau sera donné par l'équation 4. [36][37]

$$Q = m \lambda$$

Équation 3 Quantité d'énergie accumulée durant le changement de phase. Avec Q la quantité d'énergie accumulée [J], m la masse du matériau [kg] et λ la chaleur latente de fusion ou de vaporisation [J/kg]. [36][37]

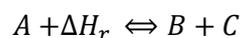
$$Q = \left(\int_{T_1}^T C_{ps} + m \lambda + \int_T^{T_2} C_{pl} \right)$$

Équation 4 Quantité d'énergie totale accumulée durant un procédé de stockage utilisant la chaleur latente partant d'une température T1 à T2. Avec Q la quantité d'énergie accumulée durant l'ensemble du processus [J], T1 et T2 températures en début et de fin de procédé de stockage [K], C_{ps} et C_{pl} chaleurs spécifiques du matériau solide et liquide [J/kg K], m la masse du matériau [kg] et λ la chaleur latente de fusion [J/kg]. [36][37]

Il existe différents types de MCP. Nous retrouvons entre autres les MCP organiques (p.ex. des paraffines), les MCP inorganiques (p.ex. sels) ou encore des MCP eutectiques (mélanges de solutions). Le choix des MCP se fait en fonction des applications, ces matériaux devant satisfaire à différents critères, notamment avoir une température de fusion qui soit adaptée. [36][37]

1.2.4 Le stockage thermochimique

La technique de stockage thermochimique repose sur l'utilisation de réactions chimiques réversibles ou de phénomènes de sorption qui, dépendant du sens de la réaction, sont endothermiques ou exothermiques. [44]. Il peut exister des réactions plus complexes mais nous pouvons pour la majorité des applications schématiser le procédé par l'équation suivante : [36][37]



Équation 5 Équation schématisant le fonctionnement du stockage de chaleur thermochimique [37]

Prenons l'exemple d'une adsorption. Dans ce phénomène, des molécules en phase gazeuse ou liquide (l'adsorbat) peuvent se fixer sur un substrat solide (l'adsorbant) notamment grâce aux interactions dipolaires ou de Van Der Waals. Si l'équation 5 représente un phénomène d'adsorption, « A » représente dès lors le couple adsorbant-adsorbat. Afin de séparer l'adsorbat de son substrat, une certaine quantité de chaleur est nécessaire. C'est à cette étape que nous allons pouvoir stocker de l'énergie thermique, la désorption étant endothermique. L'énergie ainsi stockée est égale à l'enthalpie de la réaction. L'adsorbant et l'adsorbat (« B » et « C » dans l'équation) seront stockés à l'issue de la désorption (voir figure 8) dans le but de restituer la chaleur ultérieurement en réalisant la réaction d'adsorption qui est exothermique. [36][37]

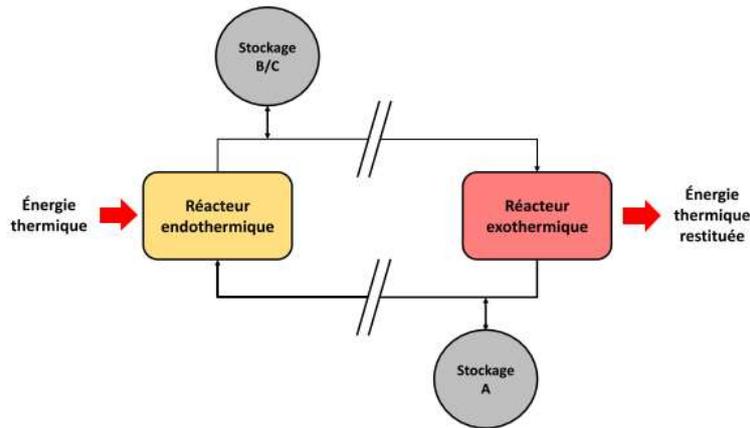


Figure 8 Schéma de fonctionnement d'un stockage thermochimique

1.2.5 Comparaisons des modes de stockage

Afin de clôturer cette partie, il est intéressant de pouvoir comparer la maturité des différents modes de stockage de la chaleur et la maturité des technologies permettant de les réaliser. Le tableau 4 nous présente un comparatif des 3 techniques de stockage présentées dans les sections précédentes. Nous remarquons que si le stockage de chaleur sensible est une technologie bien maîtrisée et simple à mettre en œuvre, elle présente néanmoins des densités énergétiques moindres.

		Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie thermochimique
Densité énergétique	Volumétrique	Faible ~15 - 60 kWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m ⁻³	Elevée ~100 - 500 kWh.m ⁻³
	Massique	Faible ~ 0,02-0,03 kWh.kg ⁻¹	Moyenne ~ 0,05-0,1 kWh.kg ⁻¹	Haute ~0,5-1 kWh.kg ⁻¹
Température de stockage		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou température ambiante
Durée de stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée (Kato & al., 2006)
Maturité		Echelle industrielle (20 MW _e)	Echelle pilote (100 kW _{th})	Echelle laboratoire (1-5 kW _{th})
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

Tableau 4 Comparaison des différents modes de stockage de chaleur.[37]

1.3 Les pompes à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) est un appareil, le plus souvent électrique, permettant de puiser de l'énergie à une basse température dans l'environnement extérieur (p.ex. dans l'air, dans l'eau ou dans le sol) pour la restituer ensuite à plus haute température afin de chauffer un bâtiment ou de produire de l'eau chaude sanitaire. Plus généralement l'énergie est puisée dans ce que l'on appelle la « source froide » et est utilisée dans ce qui est communément nommé la « source chaude ». Par le biais d'un fluide frigorigère qu'elle fait circuler en circuit fermé, la PAC réalise ce transfert d'énergie par un cycle thermodynamique identique à celui d'un réfrigérateur, appelé « cycle frigorifique ».

[45][46][47]

Comme illustré par les figures 9 et 10, la PAC est constituée d'un évaporateur, un compresseur, un condenseur et un détendeur qui lui permettent de réaliser les 4 grandes étapes de son cycle thermodynamique : [46][47]

1. L'évaporateur est un échangeur permettant au fluide frigorigère liquide de s'évaporer en puisant l'énergie disponible dans la source froide. Il permet également de réaliser une surchauffe de la vapeur afin de garantir qu'il n'y a plus de fluide frigorigère liquide à l'entrée du compresseur (voir étapes 1 à 2 et 2 à 3 dans la figure 10). À l'issue de cette étape, le fluide est à l'état gazeux, à basse pression et à basse température.
2. Le compresseur fait passer le fluide gazeux de basse pression à haute pression, augmentant par la même occasion sa température (voir étape 3 à 4 sur la figure 10). Après avoir été comprimé, le fluide est toujours à l'état gazeux, mais à haute pression et haute température.
3. Le condenseur, qui est également un échangeur, permet ensuite au fluide à haute température de relâcher l'énergie accumulée dans les étapes précédentes vers la source chaude en se condensant. Un sous-refroidissement y est également assuré afin que la totalité du fluide soit liquide au niveau du détendeur. Le fluide repasse donc à l'état liquide lors de cette étape, à haute pression et à température plus basse (voir étapes 4 à 5 et 5 à 6 sur la figure 10).
4. Enfin le détendeur permet au fluide de repasser en basse pression lors de la dernière étape (voir étape 6 à 1 sur la figure 10).

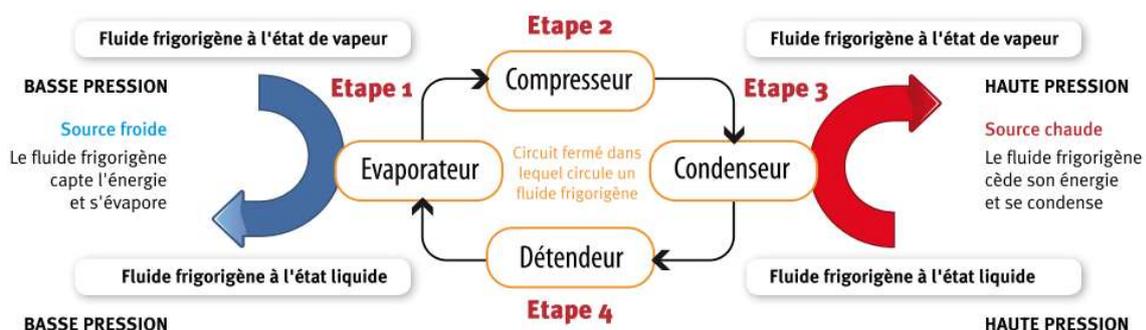


Figure 9 Les 4 étapes du fonctionnement d'une pompe à chaleur.[46]

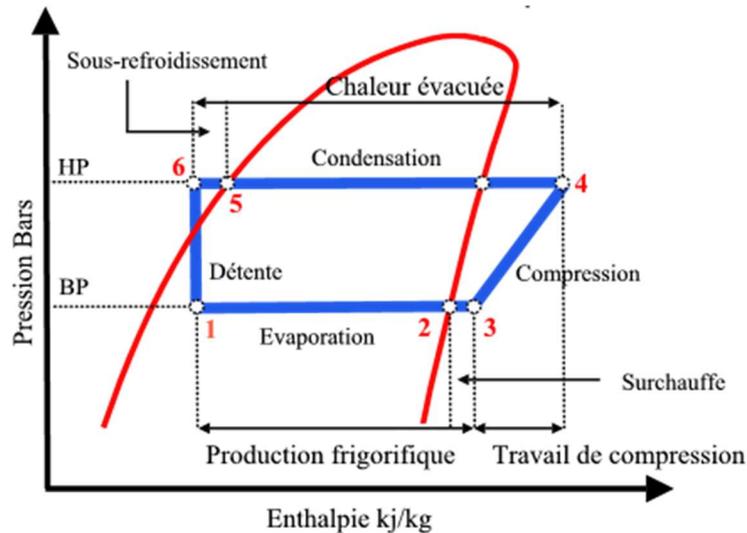


Figure 10 Diagramme enthalpique du cycle thermodynamique de la pompe à chaleur[48]

Tout l'avantage de cet appareil est de pouvoir fournir une quantité d'énergie thermique à la source chaude plus importante que l'énergie dépensée pour faire fonctionner le compresseurs et les autres auxiliaires permettant d'effectuer le transfert de chaleur (p.ex. des pompes). C'est pour cette raison que la performance d'une PAC est caractérisée par un coefficient de performance (COP), qui est le ratio entre ces deux quantités d'énergie (voir équation 6). Si une PAC a par exemple un COP de 3, cela signifie que pour 1 kWh dépensé en électricité, 3 kWh de chaleur est fourni. [19][20]

$$COP = \frac{\text{Énergie thermique cédée au condenseur}}{\text{Énergie consommée par le compresseur et auxiliaires}}$$

Équation 6 Définition du coefficient de performance (COP)

Nous pouvons toutefois distinguer plusieurs variantes du coefficient de performance : [45][47]

- Le coefficient de performance d'une PAC (COP_{PAC}), tel qu'il est communiqué par le constructeur. Ce coefficient est calculé suivant une méthodologie spécifiée par des normes (EN255 et EN14511). Ces normes décrivent les conditions dans lesquelles les PAC doivent être testées. Elles spécifient notamment la température de la source froide et de la source chaude, ceci en raison du fait que la valeur du COP dépend entre autres de la différence de température de ces 2 sources. Plus la différence de température est grande, moins la valeur du COP est importante (voir exemple de la figure 11).
- Le coefficient de performance de l'installation (COP_{INS}). Ce dernier prend en compte les différentes pertes que l'on peut rencontrer dans l'ensemble de l'installation, par exemple au niveau des échangeurs. Ce COP_{INS} aura dès lors une valeur inférieure au COP_{PAC} .
- Le coefficient de performance saisonnier (COP_{SAIS}) ou annuel est quant à lui le rapport entre la mesure de l'énergie fournie par la PAC et l'énergie dépensée par celle-ci pendant une année permettant d'évaluer la performance sur l'ensemble d'une saison de chauffe. Contrairement aux coefficients précédents, il se base sur des valeurs de consommation/production réelles.

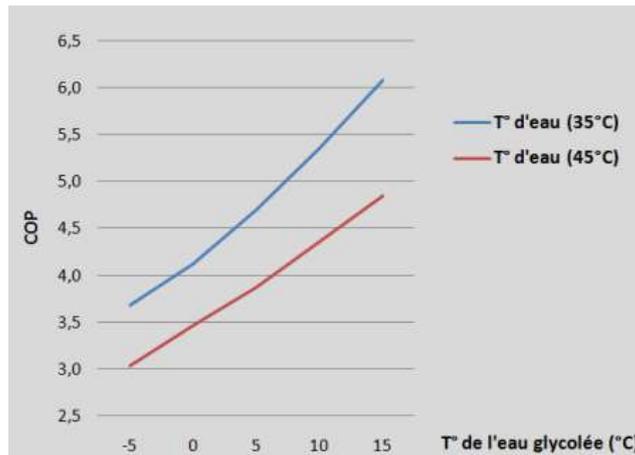


Figure 11 Exemple d'évolution de COP en fonction de la température de la source froide et de la source chaude. [47]

Il existe différents types de PAC que l'on classifie selon le milieu de captation de la chaleur et le milieu de restitution de cette dernière. Nous distinguons ainsi: les pompes aérothermiques puisant l'énergie dans l'air, les pompes géothermiques puisant l'énergie dans le sol et enfin les pompes hydrothermiques puisant l'énergie dans l'eau. Nous distinguons également 3 types de milieux de restitution à savoir l'air, l'eau et le sol qui dépendent directement du mode d'émission de la chaleur. Entre les types de milieux de captation et de restitution il existe donc plusieurs combinaisons possibles et le COP sera différent en fonction du type de pompe à chaleur choisi. En fonction des sources[46][49][50], il est généralement compris entre 1.5 et 3.5 pour une PAC air-air, entre 2 et 4 pour une eau-air, entre 3 et 5 pour une eau-eau.[46][46]

En 2015, le nombre de pompes à chaleur opérationnelles en Belgique serait de l'ordre de 92000 d'après le « Baromètre pompes à chaleur » d'Euroobserv'er [51]. Il est difficile de trouver des statistiques précises pour la répartition de ces dernières dans les 3 régions du pays. Toutefois, sachant que les pompes à chaleur sont installées *a priori* dans des bâtiments neufs, nous pouvons faire une estimation en nous basant sur la répartition des nouveaux bâtiments construits en Belgique dans les trois régions. Selon les chiffres du SPF Économie de 2015 [52], 69% des bâtiments neufs datant d'après 2006 (année ayant connu une forte progression des installations de PAC, d'après [53]) ont été construits en Région Flamande, 30% en Région wallonne et le 1% restant en Région Bruxelles-Capitale. Sur base de cette hypothèse, il y aurait de l'ordre de 27600 PAC opérationnelles en Région wallonne en 2015.

1.4 Analyse du parc immobilier en Région wallonne

Il est essentiel de définir un ou plusieurs bâtiments de référence afin de pouvoir évaluer le potentiel de flexibilité du parc immobilier en termes de déplacement de charges. C'est à partir des bâtiments représentatifs de ce parc immobilier qu'une analyse paramétrique pourra être effectuée. Nous allons dès lors étudier les caractéristiques du parc immobilier résidentiel wallon dans le but de sélectionner les types de bâtiments les plus à même de mener à bien cette étude. Nous recueillerons dans le même temps leurs différentes données techniques utiles à une modélisation ultérieure.

1.4.1 Méthodologie de détermination des bâtiments de référence

Le projet PthGR²ID se limite au secteur immobilier résidentiel de la Grande Région. Ce dernier est en effet un important consommateur d'énergie, principalement pour satisfaire ses besoins en chaleur. Dans le présent document nous nous concentrerons plus particulièrement sur le parc immobilier résidentiel de la Région wallonne.

La sélection des bâtiments de référence se fait à partir de sources différentes :

- Le site des statistiques du Service Public Fédéral (SPF) Économie (statbel) [52], recensant le nombre de bâtiments du parc immobilier belge et leur répartition sur les 3 régions. Les données de ce site sont entre autre regroupées par classe d'années, par type de bâtiments, par intervalle de superficie ou encore par nombre d'étages. Elles nous permettent d'avoir une vue assez précise sur les caractéristiques du bâti wallon.
- L'outil web issu du projet européen TABULA qui définit la typologie des bâtiments résidentiels les plus représentatifs des 13 pays européens (dont la Belgique) participant au projet. Par pays, les bâtiments de référence sont catégorisés par classe d'années et par type de bâtiments. Le site fourni ensuite, par bâtiment, la liste des paramètres des éléments constructifs, des propositions d'amélioration d'isolation, les systèmes de chauffage et enfin divers indicateurs de consommation énergétique spécifiques à ces types de bâtiments.
- Divers rapports de projets menés, entre autre, par l'Université de Liège (Smart Micro-Cogen [54], ProCEBaR [55], COZEB[56] et Flexipac [57]) ayant eu la même nécessité de définir des bâtiments de référence pour les besoins de leurs études. Ils nous permettent de croiser les chiffres et réévaluer certains paramètres le cas échéant.

En premier temps, les statistiques du SPF Économie sont analysées dans le but de caractériser le parc immobilier résidentiel wallon. Pour mettre en évidence les bâtiments représentatifs, l'étude de ces données se fera sous l'angle de l'année de construction d'une part et la typologie du bâtiment d'autre part. Dans un souci de garder des classes de données proches de celles retrouvées dans les différentes statistiques et études précitées, les classes que nous utilisons sont les suivantes :

- Année de construction : « Avant 1946 », « 1946-1961 », « 1962-1970 », « 1971-1981 », « 1982-1995 », « 1996-2006 », « 2006-2011 », « 2012-2015 ».
- Typologie du bâtiment : « Mitoyen », « Semi-mitoyen », « 4 façades », « Buildings et immeubles à appartement ».

Dans un deuxième temps, ces données de recensement sont complétées avec le potentiel de rénovation en Région wallonne ainsi qu'une estimation du nombre de PAC installées. Ces deux

données sont, dans notre contexte, des éléments intéressants à prendre en compte dans le choix de nos bâtiments, tout comme pour les analyses futures.

Ensuite, la sélection des bâtiments de référence pourra se faire selon deux axes principaux :

- Recherche de bâtiments hautement représentatifs du parc immobilier, mais pour lesquels il faudra éventuellement investir dans une rénovation. Ce type de bâtiments pourrait représenter un potentiel de flexibilité de la demande important. Toutefois, sachant que les bâtiments rénovés sont de moins bons candidats pour l'installation de pompes à chaleurs, un système de chauffage auxiliaire devra peut-être être considéré pour satisfaire les besoins de chauffage tout au long de l'année (p.ex. un système bivalent, une pompe à chaleur hybride, ...)
- Recherche de bâtiments qui ont un potentiel rapidement mobilisable dans un projet promouvant le « Power-To-Heat ». Il s'agit d'un bâtiment très récent ayant des niveaux d'isolation compatibles avec l'utilisation de pompes à chaleur, voire étant déjà équipé d'un tel système.

Après sélection des bâtiments de référence, une recherche des caractéristiques représentatives de ces derniers sera effectuée à l'aide de l'outil TABULA et des diverses études mentionnées plus haut, notamment afin de définir la composition des parois, voire des systèmes installés.

1.4.2 Caractéristiques du parc immobilier de la Région wallonne

Comme nous le montre la figure 12, le parc immobilier résidentiel de la Région wallonne est caractérisé par un taux élevé d'anciens bâtiments. D'après les statistiques du SPF Économie [52], plus de 50% du bâti wallon a été construit avant 1946 et seul un cinquième des constructions datent d'après 1981. Le pourcentage des bâtiments résidentiels érigés après 2006 tombe à 6%. A titre de comparaison, en Flandre, le pourcentage de bâtiments construits avant 1946 d'une part et après 1981 d'autre part sont respectivement de 29% chacun.

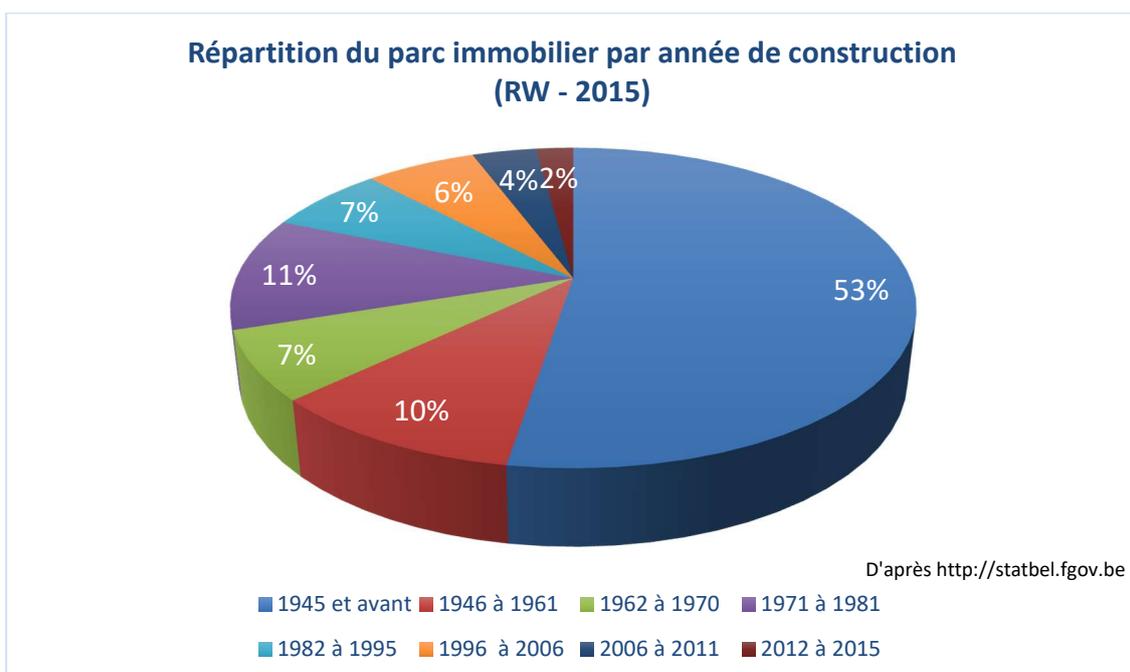


Figure 12 Répartition du parc immobilier résidentiel en Région wallonne en 2015, d'après [52]

Si nous détaillons quelque peu ces chiffres avec la typologie des bâtiments, nous pouvons observer dans le tableau 5 ainsi que dans la figure 13 que, toujours d'après le SPF économie [52], les deux types de bâtiment les plus représentés en Région wallonne sont des bâtiments mitoyens (24%) et semi-mitoyens (17%) construits avant 1946. La répartition des types de bâtiment sur les différentes classes d'années après 1945 se fait ensuite de manière plus uniforme avec des taux généralement en-dessous de 5%. En revanche, si nous prenons uniquement le type de construction en compte, ce sont les maisons 4 façades qui sont les plus représentées (38%), toutes années de construction confondues ; les constructions mitoyennes et semi-mitoyennes suivent respectivement à 31% et 27%. Les buildings et immeubles à appartement sont *a contrario* fort peu présents dans le parc immobilier (moins de 3%). Si les 4 façades sont aujourd'hui encore le type de bâtiments le plus construit, la tendance commence à ralentir au profit des bâtiments semi-mitoyens (voir figure 14).

	Mitoyen	Semi-Mitoyen	4 Façades	Buildings et immeubles à appts
Nombre de bâtiments érigés en 1945 et avant	314803	223990	139664	10841
Nombre de bâtiments érigés de 1946 à 1961	42104	46228	43002	3963
Nombre de bâtiments érigés de 1962 à 1970	17159	23620	46811	3878
Nombre de bâtiments érigés de 1971 à 1981	22343	32388	90831	4194
Nombre de bâtiments érigés entre 1982 - 1995	7601	11003	67488	2098
Nombre de bâtiments érigés entre 1996 - 2005	4921	9679	64340	2908
Nombre de bâtiments érigés entre 2006-2011	4071	8549	31678	3163
Nombre de bâtiments érigés entre 2012 - 2015	2833	6925	15291	2327

Tableau 5 Bâtiments érigés en Région wallonne classés selon leur typologie et leur année de construction, d'après[52]

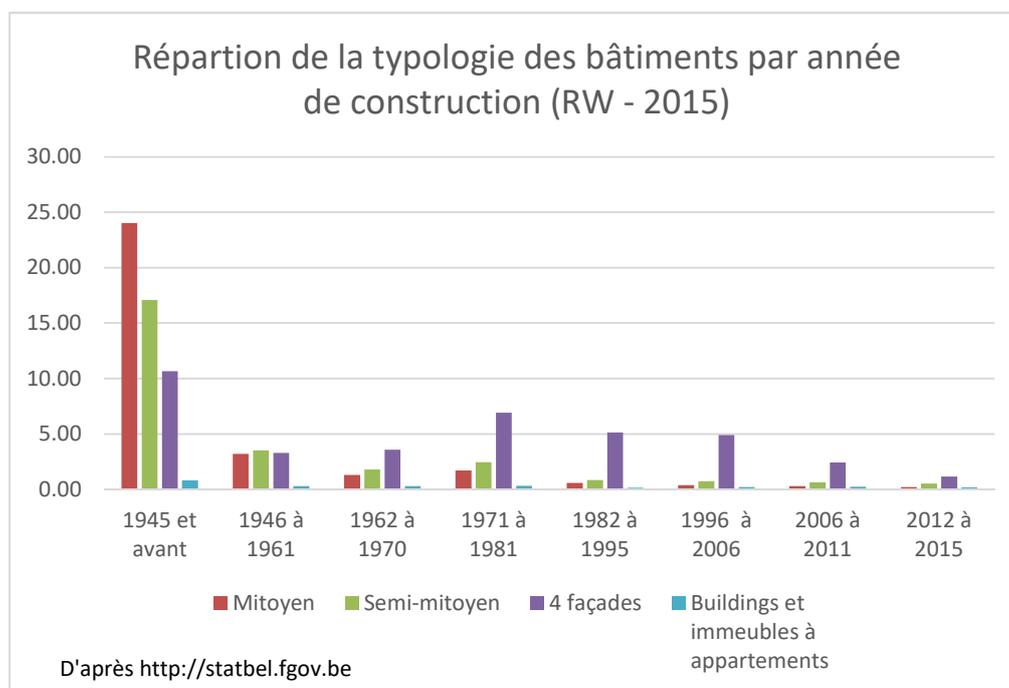


Figure 13 Répartition de la typologie des bâtiments par année de construction d'après [1]

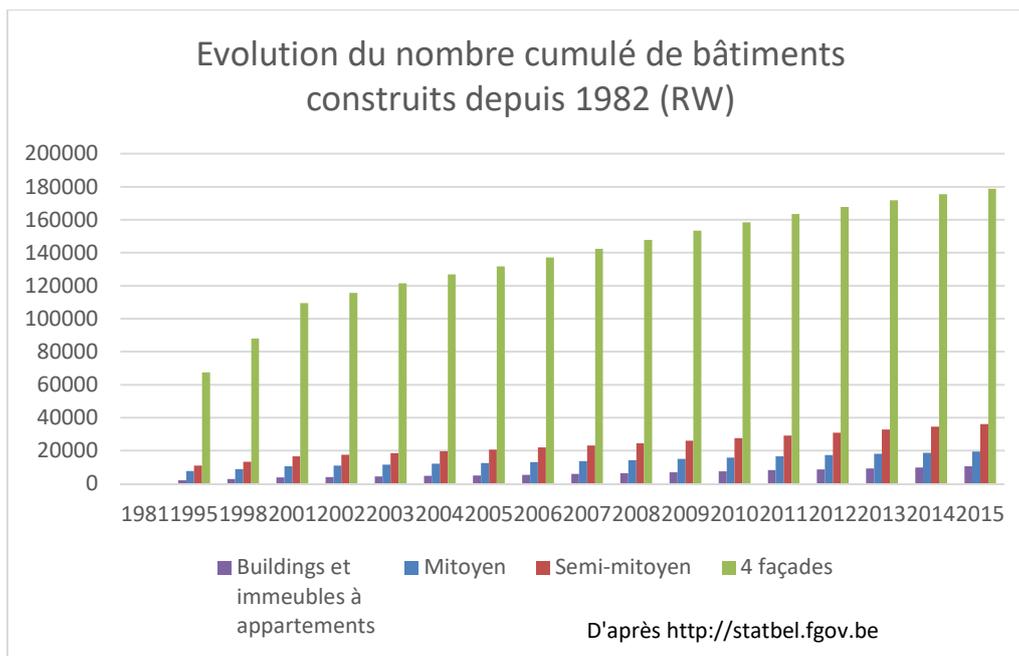


Figure 14 Évolution du nombre cumulé de constructions depuis 1982, d'après [52]

1.4.3 Potentiel de rénovation et état de l'isolation du parc immobilier

Outre le constat d'un bâti majoritairement ancien en Région wallonne que nous avons pu faire dans le point précédent, l'isolation de ces bâtiments est un élément important à prendre en compte. D'après le « Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie »[58], « 11 % des logements ne possèdent aucune isolation, 40 % de toitures (ou de planchers de combles) restent à isoler, 19 % de constructions ne sont équipées que de simples vitrages, seuls 21 % des maisons unifamiliales possèdent une isolation de la dalle de sol (sur cave, sur vide ventilé ou sur terre-plein) et seulement 29 % des logements possèdent une isolation complète de leurs murs extérieurs » et le taux de rénovation annuel serait de 1%. Nous pouvons conclure, d'après ces chiffres, qu'il y a aujourd'hui encore un haut potentiel de rénovation du bâti wallon. Cet aspect doit être pris en compte dans le choix des bâtiments de référence.

2 Méthodologie

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons expliquer comment nous allons procéder pour notre étude de la flexibilité de la demande en chauffage d'un bâtiment représentatif de Wallonie. Sur base de l'analyse du parc immobilier wallon (voir section 1.4), nous allons dans un premier temps présenter le bâtiment qui sera sélectionné pour l'analyse et détaillerons ses principales caractéristiques. Après avoir choisi le bâtiment type sur lequel nous travaillerons, nous commenterons les divers outils nous permettant de modéliser ce bâtiment ainsi que l'approche suivie pour y aboutir. Enfin, nous détaillerons les divers scénarios et variantes de simulation ainsi que leur paramétrage afin de mener à bien cette étude.

2.2 Sélection du type de bâtiment étudié

2.2.1 Critères de sélection du bâtiment étudié

La section 1.4 a fait état des caractéristiques du bâti wallon, de son potentiel de rénovation de même que de l'implantation des PAC dans la région. S'il semble intuitif d'étudier le potentiel du stockage thermique en Région wallonne sur base de bâtiments rapidement mobilisables (Bâtiments neufs avec haut niveau d'isolation, voire déjà équipés d'une pompe à chaleur), on peut constater que ce type de bâtiment n'est pas très représentatif du parc immobilier étudié. Nous avons effectivement remarqué que les bâtiments les plus représentatifs en Région wallonne sont des bâtiments datant d'avant 1946. Si nous nous basons sur le seul aspect mobilisable du bâti, nous excluons d'entrée de jeu plus des 4/5^{ème} du parc wallon. Le tableau 6 décrit une réflexion sur le potentiel et les limites de flexibilité des bâtiments anciens et neufs. Si les bâtiments anciens semblent pour certains aspects moins adaptés à être intégrés dans un projet « Power-To-Heat », ils pourraient de par leur plus grande consommation avoir un plus grand potentiel de déplacement de charge. Cependant, il faut être conscient des limites à utiliser une pompe à chaleur pour couvrir tous les besoins dans ce genre de bâtiments, même rénovés.

Bâtiment ancien (avant 1946)	Bâtiment neuf (après 2006)
La flexibilité au niveau des charges déplacées pourrait être plus grande, vu que le bâtiment consomme plus d'énergie.	Flexibilité plus grande au niveau du confort dû à une isolation plus importante.
Moins bien adapté à du chauffage (très) basse température et à des systèmes de PAC.	Mieux adapté à du chauffage (très) basse température et à des systèmes de PAC.
<i>A priori</i> , nécessite des rénovations lourdes	<i>A priori</i> , peu de rénovations nécessaires et rapidement mobilisable
Inertie à évaluer dans les deux cas	

Tableau 6 Réflexion sur le potentiel et limites de flexibilité des bâtiments anciens ou neufs

Malgré des caractéristiques fort différentes, ces 2 typologies de bâtiments semblent avoir chacune du potentiel en terme de stockage thermique et de déplacement de charges, qui seront *a priori* exploités et mobilisés différemment. Il semble dès lors intéressant, dans le cadre du projet PTH4GR²ID, de choisir deux bâtiments de référence pour la Région wallonne :

- **Maison mitoyenne construite avant 1946.** Ce type de bâtiment couvre 24% du parc immobilier résidentiel wallon, tout en sachant que les bâtiments semi-mitoyens érigés durant la même période représentent eux 17% du bâti, ces deux typologies étant parfois considérées ensemble dans certaines études telles que Tabula [59]. *A priori*, ils nécessitent des investissements plus importants en termes d'isolation et des systèmes plus coûteux.
- **Maison 4 façades neuve datant d'entre 2006-2011.** Bâtiment moins représenté dans le parc wallon (seulement 2,4%), mais *a priori* mobilisable à moindre investissement dans un projet « Power-To-Heat ».

2.2.2 Présentation du bâtiment choisi pour l'étude

En conclusion de l'analyse du parc immobilier en RW décrit dans la section précédente, deux bâtiments types semblent être de bons candidats à l'étude du potentiel de flexibilité : d'une part un bâtiment hautement représentatif du parc mais qui devra être sujet à rénovation et d'autre part un bâtiment récent, mais moins présent dans le bâti wallon. Les analyses du présent mémoire s'effectueront sur le premier type que nous allons décrire dans cette section, à savoir une maison mitoyenne construite avant l'année 1946.

Le bâtiment choisi correspond à une maison de type « ouvrière » mitoyenne comme illustré sur la figure 15. Ce bâtiment est sélectionné pour sa haute représentativité des maisons mitoyennes construites avant 1946, il représente à lui seul 18% des bâtiments construits avant 1991 [60]. Sa superficie habitable (de l'ordre de 60m²) est également représentative des maisons mitoyennes, à savoir que 65% d'entre elles ont une superficie inférieure à 85 m² [60]. Ce type de bâtiment a également été sélectionné comme bâtiment type dans différentes études précitées comme SMC [54] ou ProCEBaR [55].



Figure 15 Illustration du bâtiment type choisi [60]

Comme illustré dans la figure 16, le bâtiment est constitué de deux étages habités, comportant en tout 7 pièces chauffées en plus d'un grenier non-aménagé. Le sol est composé d'une couche de béton revêtue d'une chape. Les murs extérieurs ainsi que les parois internes sont en briques en terre cuite. Le toit quant à lui est composé d'une charpente en bois couverte de tuiles. Au niveau isolation, nous partons de l'hypothèse qu'aucune rénovation n'a été effectuée jusqu'à présent excepté la pose de double vitrage. Ceci est cohérent avec l'analyse du bâti effectuée dans le « Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie » qui estime que près de 80% des bâtiments construits entre 1919 et 1945 ne sont pas isolés, mais que 81% du bâti est équipé de vitrages isolants (dont 82% sont complètement équipés de ces vitrages) [60]. Nous retrouvons les différentes caractéristiques des parois du bâtiment dans le tableau 7 ainsi que les superficies et volumes des pièces dans le tableau 8. Au vu des coefficients de transmission thermique U, nous pouvons constater que ce bâtiment a un haut potentiel de rénovation. Un calcul simplifié avec le logiciel PEB estime le niveau d'isolation thermique à K 165 ce qui est très loin des exigences actuelles de la réglementation PEB

concernant les nouveaux bâtiments résidentiels qui plafonne cette valeur à maximum K 35 en Wallonie [61].



Figure 16 Plans des différents étages du bâtiment choisi [55]

	Matériau	Épaisseur [m]	Coefficient λ [W / m K]	Chaleur spécifique [kJ / kg K]	Masse volumique [kg / m ³]	Coefficient U [W/m ² K]
Murs extérieurs	Brique	0.2	1.1	0.84	1800	2.45
	Plaque Plâtre Carton	0.014	0.25	1	900	
Parois intérieures	Brique	0.2	1.1	0.84	1800	2.84
Murs mitoyens	Béton creux	0.2	0.85	1	1300	2.47
Toiture	Bois	0.008	0.12	1.88	600	3.99
	Tuile	0.015	1.1	0.84	1800	
Plancher	Parquet	0.02	0.13	1.6	600	2.3
	Chappe	0.05	1.15	1	1700	
	Béton	0.15	2.2	1	2400	
Plafond	Parquet	0.02	0.13	1.6	600	1.02
	OSB	0.02	0.13	1.7	500	
	Bois	0.06	0.12	1.88	600	
Double vitrage						2.95 (G-Value : 0.78%)

Tableau 7 Caractéristiques des parois du bâtiment

Zones	Surface [m ²]	Volume [m ³]
Cuisine	6.01	15.66
Salon	12.49	34.18
Buanderie	6.01	15.66
Cage d'escalier	4.01	27.01
Chambre 1	7.82	21.25
Chambre 2	12.42	33.75
Salle de bain	5.11	13.85
Grenier	38.40	55.92

Tableau 8 Caractéristiques des pièces du bâtiment

2.3 Modélisation du bâtiment type et définition de ses paramètres de fonctionnement

Différents logiciels seront utilisés afin de pouvoir modéliser notre bâtiment et de pouvoir lancer les simulations qui serviront de base à notre analyse du potentiel de flexibilité. La présente étude utilisera le logiciel de simulation TRNSYS « simulation studio », ainsi que son interface additionnelle TRNBuild, et SketchUp avec le plug-in Trnsys3D.

TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique de la thermique des bâtiments qui est largement utilisé, notamment dans de nombreuses universités. Sa grande flexibilité permet aussi bien de simuler des bâtiments complets qu'un équipement en particulier. Une large librairie de composants, appelés « Types », nous permettra de modéliser notre bâtiment et de lancer des scénarios de simulation afin d'obtenir les données qui nous seront utiles pour notre analyse. Chaque type peut nécessiter différentes configurations (paramètres) et/ou des données provenant d'un autre type (input) et peut générer un certain nombre de résultats (output). Un type particulier, le Type56, nous permet de modéliser les différentes caractéristiques du bâtiment (géométrie, composition des parois, chauffage, ventilation, ...). Afin de faciliter l'encodage de ces différents paramètres, ce type est accompagné d'une interface particulière appelée TRNBuild. [62]

SketchUp est un logiciel de modélisation 3D. Il nous permettra de modéliser la géométrie de notre bâtiment et d'exporter les données de cette dernière vers TRNBuild au moyen du plugin Trnsys3D.

Enfin, les logiciels MS Access et MS Excel nous permettront de traiter les données extraites des simulations TRNSYS de même que de réaliser certains scripts en langage VBA (Visual Basic for Applications) permettant d'automatiser des analyses paramétriques.

2.3.1 Modélisation du bâtiment dans SketchUp

La première étape de notre modélisation concerne la géométrie du bâtiment de référence et la création des différentes zones thermiques de ce dernier. L'étude SMC [63] ayant choisi le même type de bâtiment de référence, nous nous inspirerons du modèle SketchUp qui a été mis en œuvre pour cette étude. Les figures 17 et 18 illustrent le modèle réalisé au moyen du logiciel SketchUp. Le modèle respecte les dimensions externes, ainsi que l'emplacement des pièces du bâtiment comme détaillé sur le plan (voir figure 16). Toutefois une légère simplification est apportée au niveau de la modélisation de la cage d'escalier, ne reproduisant pas le léger renforcement que l'on peut voir sur le plan dans le living et le hall de nuit au premier étage. Ceci permet d'éviter les problèmes qui peuvent subvenir lors

de la simulation de pièces concaves avec le logiciel TRNSYS. La façade avant est orientée plein sud et comporte 4 vitrages d'1 m² chacun. La façade arrière quant à elle possède 2 vitrages un de 1,5 m² au rez-de-chaussée et l'autre de 1 m² à l'étage. Toutes les pièces sont des zones thermiques à part entière, y compris la cage d'escalier et le grenier. La composition des parois n'est pas définie dans SketchUp (ceci sera fait avec TRNBuild), même si le type de construction (mur externe, parois interne, mur mitoyen, sol, toit, ...) est spécifié dans le modèle.

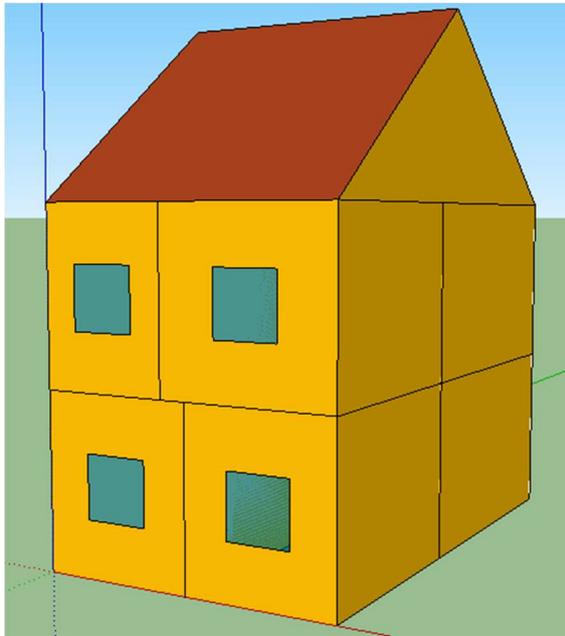


Figure 17 Modélisation du bâtiment. Façade avant, orientation sud.

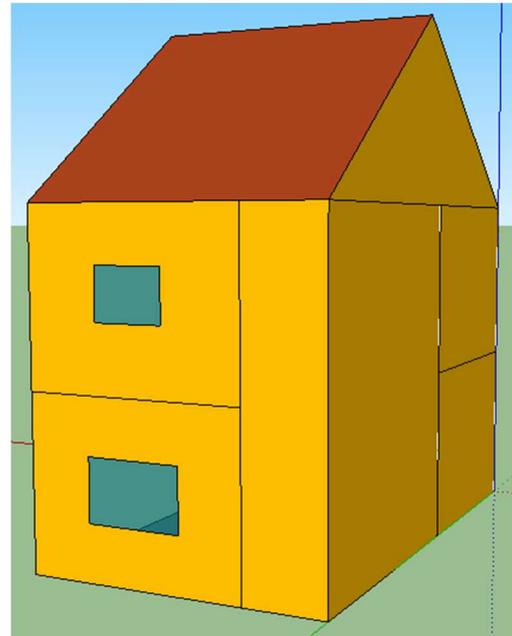


Figure 18 Modélisation du bâtiment. Façade arrière, orientation nord.

2.3.2 Modélisation dans le logiciel TRNSYS

Après avoir modélisé la géométrie du bâtiment et défini les différentes zones thermiques de celui-ci dans SketchUp, nous pouvons à présent modéliser les différents autres aspects de la simulation dans TRNSYS. Nous allons expliquer la configuration du cas de base qui sera ensuite décliné sous certaines variantes, au cas par cas, en fonction des scénarios de simulation (voir sections 2.5.1 et 2.5.2) et/ou de l'évaluation des besoins en chauffage du bâtiment. Les figures 19 et 20 illustrent les éléments les plus importants du modèle. Le modèle se veut volontairement simple, à savoir qu'il ne comprend pas de systèmes spécifiques (pompe à chaleur, ballon de stockage, radiateurs, vanne thermostatiques,...) modélisés ; l'étude voulant se focaliser sur le potentiel de flexibilité du bâtiment dans le cadre de l'équilibrage des réseaux électriques.

Comme déjà évoqué, le Type 56 permet de modéliser des bâtiments multizones thermiques dans TRNSYS. C'est dans notre modèle l'élément central (« Building »). Afin d'être paramétré correctement ce Type a besoin de nombreuses configurations et d'inputs. Au niveau des configurations notons les suivantes :

- La géométrie et l'agencement des pièces. Cette partie est grandement facilitée car la modélisation a été effectuée avec le logiciel SketchUp muni du plugin Trnsys3D. En important le fichier de modélisation 3D dans l'interface TRNBUILD, on évite de devoir entrer manuellement les différentes mesures.

- La composition des parois. Nous avons vu que cette partie n'a pas été prise en charge lors de la modélisation SketchUp. Il nous faudra donc encoder les différents types de matériaux (ou utiliser ceux qui existent dans les bibliothèques) avec leurs propriétés utiles (densité, chaleur spécifique et masse volumique) et configurer les différentes compositions de parois, comme décrit dans le tableau 7 pour le cas de base.
- La puissance de chauffe. Comme évoqué plus haut, aucun système de chauffage spécifique ne sera modélisé. Afin de simuler la chauffe du bâtiment, il sera toutefois nécessaire de spécifier une puissance de chauffe dans chaque pièce, ce que nous allons effectuer au moyen du « Heating type manager » de TRNBUILD. Nous allons soit utiliser la puissance illimitée (TRNSYS détermine la puissance qu'il faut pour atteindre instantanément la température de consigne) à des fins de calculs de besoin et/ou dimensionnement, soit une puissance déterminée et dimensionnée pour lancer les scénarios de test. De même aucun émetteur spécifique ne sera configuré dans le modèle, nous partons de ce fait sur l'utilisation d'émetteurs légers. Ceci a également pour conséquence que **les résultats, notamment en termes de consommation énergétique, devront être interprétés par rapport à un système de chauffe avec un rendement de 100%** car aucun COP n'interviendra dans la production des résultats.
- Les taux d'infiltration, qui pourront varier en fonction des cas de test.
- Les débits de ventilation pour les simulations mettant en place ce type de systèmes.
- Les gains internes liés à l'occupation ou à l'utilisation des appareils électriques.

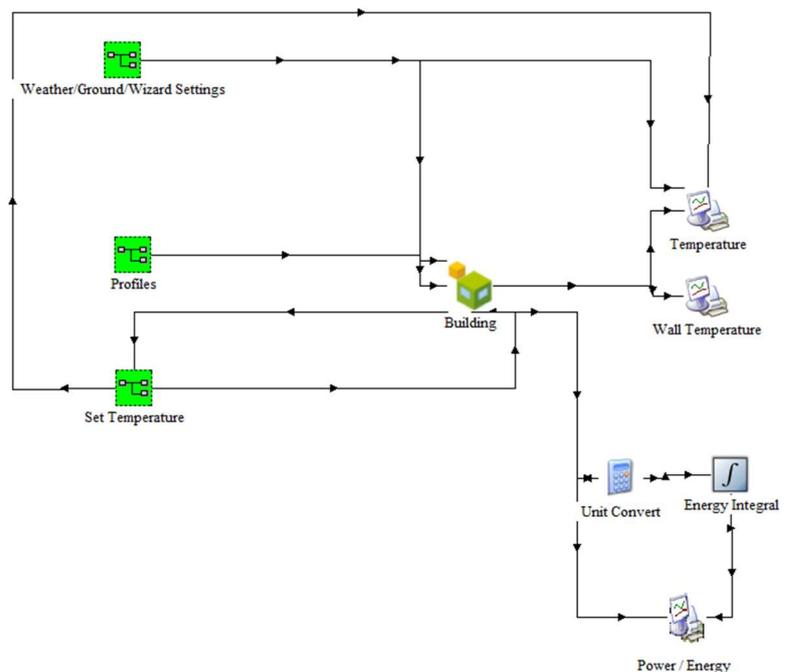


Figure 19 Modèle TRNSYS de base

Au niveau des inputs, notre modèle de bâtiment a besoin de :

- La température du sol. Celle-ci peut être modélisée grâce au Type77 sur base d'une température moyenne du sol, une amplitude maximale et un décalage dans le temps
- Les conditions climatiques (températures externes, rayonnement, humidité,...). Le Type15-2 (Weather data), permet de modéliser ces dernières. Il se base sur des données

météorologiques « Meteonorme », offrant des données complètes pour de nombreux emplacements.

- Différents *schedules* (Type14h) nous permettant de définir des scénarios d'occupation et de gains internes.
- Différents *schedules* nous permettant de définir les températures de consigne hautes et basses pour la semaine et le week-end. De plus, le modèle doit prévoir que cette température puisse être modifiée par un « signal » afin de simuler un arrêt/ralenti de la chauffe suite à un signal du réseau électrique.
- Un échangeur de chaleur (non représenté sur la figure 19), pour les simulation mettant en œuvre de la ventilation avec récupération de chaleur par le biais du Type91.

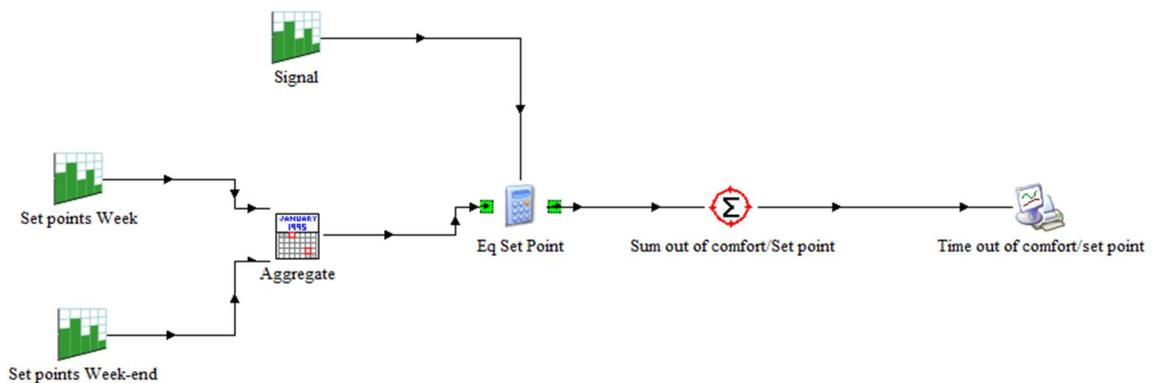


Figure 20 Modèle TRNSYS de base : détail de la macro « Set Temperature »

Nous détaillerons les valeurs utilisées pour ces paramètres et inputs que nous avons mentionnés dans la section 2.3.3.

En output, le modèle TRNSYS nous permettra de ressortir les données utiles à l'étude, par pas d'un quart d'heure, à savoir la température extérieure, la température de l'air et la température opérative des pièces du bâtiment, la température des parois des pièces qui seront étudiées, la puissance demandée et l'énergie utilisée afin de chauffer le bâtiment.

2.3.3 Paramétrage du modèle

2.3.3.1 Emplacement du bâtiment et conditions météorologiques

La présente analyse se focalisant sur la Wallonie, nous paramètrerons en conséquence les conditions climatiques à partir d'un fichier météorologique de TRNSYS dont les données sont les plus représentatives de la météo de cette région. Nous choisirons les conditions météorologiques de la ville de St-Hubert, située en Province du Luxembourg. Le tableau 9 reprend différentes caractéristiques des données météorologiques pour le mois de janvier. La figure 21 et la figure 22 nous montrent respectivement l'évolution des températures et l'irradiation solaire durant le mois de janvier. Durant ce mois nous pouvons observer des températures de l'air externe descendant jusqu'à -11 °C. L'irradiation solaire maximale du mois de janvier se situe aux alentours des 350 W/m², faisant de ce mois de janvier un mois peu ensoleillé.

Conditions météorologiques du mois de janvier	
Lieux	St Hubert, Province du Luxembourg
Température min	-11°C
Température max	9°C
Température moyenne	-2.8°C
Jour le plus froid	15 janvier
Jour à température moyenne	29 janvier

Tableau 9 Caractéristiques des conditions météorologiques durant le mois de janvier

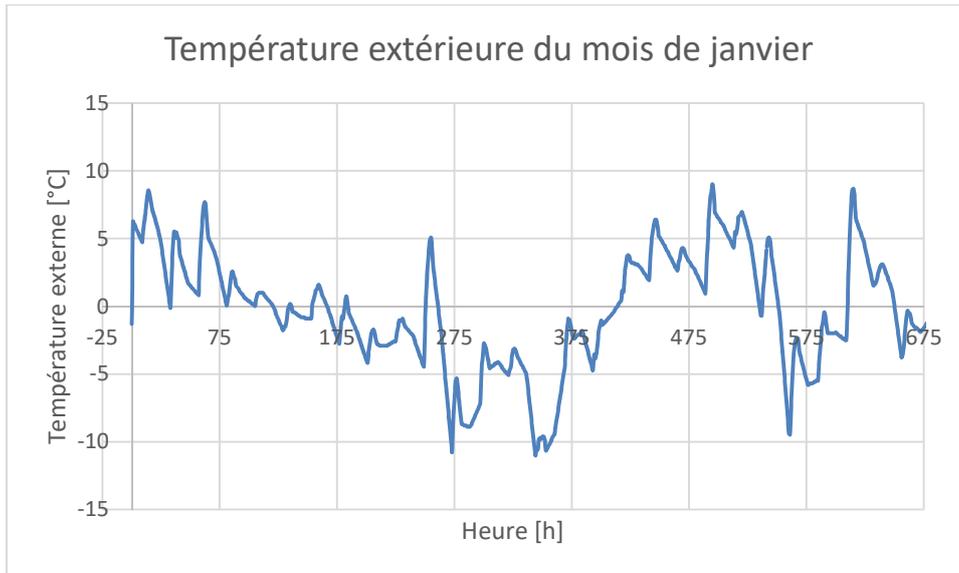


Figure 21 Évolution de la température extérieure du mois de janvier à St Hubert

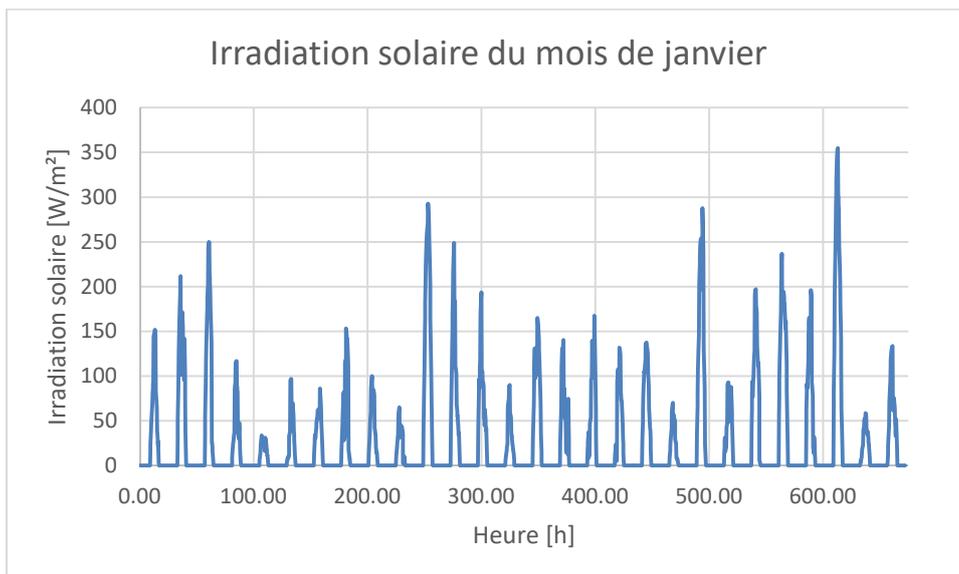


Figure 22 Irradiation solaire du mois de janvier à St-Hubert

2.3.3.2 Scénarios d'occupation et de gains internes (appareils et éclairage)

Le modèle sera complété par un scénario d'occupation du bâtiment ainsi que des profils de gains internes afin de prendre en compte les apports provenant des appareils électriques et de l'éclairage. Le bâtiment est considéré habité par une famille de 4 personnes ; 2 adultes et 2 enfants. Les valeurs des apports proviennent de fichiers Excel de calcul de profils de gains ayant été établis pour d'autres études menées par l'équipe BEMS de l'ULg, à savoir IEA annexe 58 [64] et Vallenergie [65]. Nous retrouverons l'ensemble des profils utilisés de notre modèle en annexe A. Les parts convective et radiative sont respectivement de 60 et 40% pour les apports des occupants et de l'éclairage et de 40 et 60% pour les appareils électriques.

2.3.3.3 Définition des paramètres de chauffe et dimensionnement

Comme nous le verrons plus tard, différents scénarios de simulation seront exécutés afin d'estimer le potentiel de flexibilité du bâtiment. À chaque niveau d'isolation, de type de ventilation et de température de consigne de confort étudié correspond un dimensionnement de la puissance de chauffe particulier afin de contrer les pertes par transmission et par ventilation. Vu le nombre de cas de dimensionnement différents, nous ferons le dimensionnement à l'aide du logiciel TRNSYS pour chacun de ces cas. À cet effet, nous configurerons la puissance de chauffe à l'infini dans le Type56, à savoir que c'est le logiciel qui calculera la puissance de chauffe nécessaire. Tous les gains internes seront supprimés lors de ces calculs et le régime de chauffe sera en continu. Nous sortirons les puissances que le logiciel aura calculées à l'aide d'un Type65 (« Online Plotter»), permettant d'exporter certaines données dans un fichier texte. La puissance retenue pour le dimensionnement de chaque pièce correspondra à la puissance maximale utilisée durant la dernière quinzaine de janvier. Afin de valider cette méthode un cas a été calculé manuellement. Une différence de 10% de puissance en plus a été observée dans le calcul manuel pour une isolation de 6 cm, différence qui peut s'expliquer entre autres par le fait que TRNSYS prend en compte des gains solaires et l'inertie du bâtiment, ce qui n'est pas le cas avec le calcul manuel. Nous pouvons retrouver le dimensionnement pour les différents cas d'isolation envisagés en annexe B. Ces différentes puissances de chauffe seront utilisées dans les différents scénarios de simulation, configurées cette fois-ci en puissance limitée dans le Type56. Les parts radiative et convective du chauffage dans les pièces est respectivement de 30 et 70%.

Toutefois, comme spécifié ci-dessus, le dimensionnement se fait en régime continu et ne tient donc pas compte d'éventuels problèmes de relance et d'inconfort qui y sont associés. Le bâtiment de référence étant peu performant sur le point de vue énergétique, une analyse plus poussée devra être effectuée afin de déterminer le choix des différentes températures de consigne ainsi que la durée du ralenti nocturne en régime intermittent ou encore le calcul d'une éventuelle surpuissance pour la relance dans le but d'être dans des conditions de confort et de temps de relance acceptables en dehors de tout scénario de simulation spécifique. Cette analyse sera décrite dans la section 2.4.

2.4 Analyse des paramètres de chauffe

L'étude ayant pour but d'analyser le potentiel de flexibilité du bâtiment, il est essentiel que le bâtiment puisse offrir, en dehors de tout scénario de coupure du chauffage, un niveau de confort suffisant et avoir des temps de relance du chauffage raisonnables en régime intermittent. Outre le dimensionnement (voire le surdimensionnement) de la puissance de chauffe nécessaire pour satisfaire les besoins du bâtiment, il faut définir correctement la température de consigne haute (ou température de consigne de confort), le nombre de degrés de différence avec la consigne basse (ou température de consigne économique) et la durée des plages de ralenti nocturne dans le but de

garantir ces conditions de confort de base; et cela pour les différents niveaux d'isolation que nous allons analyser dans cette étude (voir section 2.5.2.1, tableau 15). Cette analyse se fera en étudiant différents scénarios de simulation réalisés avec TRNSYS.

Au préalable, il convient d'établir certaines contraintes à respecter. Travaillant dans un régime de chauffage intermittent, il nous faut définir un temps de relance maximum pour atteindre la température de consigne supérieure après un ralenti nocturne. De même, afin d'évaluer l'inconfort qui pourrait être causé soit par les ralentis nocturnes, soit par un scénario de coupure de chauffage, il est nécessaire de définir un intervalle de tolérance dans lequel devra se trouver notre température opérative à défaut d'être en situation d'inconfort thermique. Nous retrouverons dans le tableau 10 les valeurs qui ont été choisies afin d'effectuer cette étude.

Contraintes	
Temps de relance maximum	2h
Intervalle de tolérance pour la température opérative	19°C - 21°C

Tableau 10 Contraintes à respecter dans l'analyse des paramètres de chauffe

D'après différentes sources [66][67][68], le temps de relance du chauffage en régime intermittent est directement influencé par le nombre de degrés de différence entre la température de consigne haute et la chute de température provoquée par le ralenti, sa durée ainsi que l'inertie du bâtiment. D'après le projet LEHR [69], le temps de relance peut être diminué en modérant ces différents paramètres, à savoir diminuer la plage de ralenti, limiter la chute de température lors de ce dernier. La norme EN 12831 [70] quant à elle préconise le calcul d'un surdimensionnement basé sur les différents paramètres précités. Pour ce faire, elle fournit des tableaux de facteurs de relance (f_{rh}) spécifiant un nombre de W/m^2 dépendant de ces paramètres. Toutefois, d'après l'étude de Peeters et al. [71], cette norme surestimerait la surpuissance nécessaire après un ralenti nocturne. Ces surdimensionnements ne sont pas des exceptions dans le calcul de la puissance de chauffe, par exemple aux Etats-Unis, la norme ASHRAE 90.1 dans son annexe G [72] (« Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings ») conseille de surdimensionner les systèmes de chauffage de 25%.

Nous allons établir différents scénarios de simulation tenant compte d'une part des différents niveaux d'isolation et d'autre part de deux températures de consignes différentes (20 et 21°C). La période étudiée sera l'ensemble du mois de janvier. Ces différents scénarios se baseront sur 3 variantes principales :

- La chute de température maximale que l'on peut expérimenter suite à un ralenti nocturne. Nous nommerons cette différence de température au moyen du terme « **delta de température** ». Comme nous allons travailler avec différents niveaux d'isolation, ce delta pourrait varier entre chaque cas, la consigne de température économique n'étant pas forcément atteinte dans tous les cas. Nous allons donc par simplification considérer ce delta comme étant la différence entre les températures consignes de confort et économiques, soit entre 2 et 4°C.
- La durée du ralenti nocturne entre 6 et 8h.
- L'application (ou non) d'un surdimensionnement de la puissance de chauffe. Nous étudierons dans un premier temps une surpuissance calculée par ajout successif de tranches de 10% du dimensionnement de base. Dans un deuxième temps nous utiliserons la norme EN 12831 afin

de calculer un surdimensionnement. Comme déjà évoqué, cette norme propose des facteurs de relance (f_{rh}) notamment estimés sur base de la chute de température observée après un ralenti et du temps de relance désiré. Notre temps de relance est de 2 heures maximum. Afin de limiter le surdimensionnement, la chute de température suite à un ralenti nocturne a été observée un jour de température moyenne durant la période de l'étude et nous éviterons dans la mesure du possible de dépasser les 30% de surpuissance. Contrairement à la transposition belge de la norme (NBN EN 12831), la transposition française propose des facteurs de relance pour un delta de température de 1°C. Les facteurs pour les autres deltas (2°C, 3°C et 4°C) étant de même ordre de grandeur, nous utiliserons ceux de la norme française. Par conséquent, pour les différents niveaux d'isolation étudiés, nous utiliserons un f_{rh} de 22W/m² entre 0 et 2 cm d'isolation, un f_{rh} de 11W/m² entre 4 et 6 cm d'isolation et un f_{rh} de 6 W/m² pour les 3 derniers niveaux d'isolation (8 cm, 6 cm+triple vitrage (TV) et 8 cm+ triple vitrage (TV)). Nous retrouverons les valeurs des surdimensionnement en annexe B.

Le tableau 11 résume les différents scénarios étudiés. Notons qu'à des fins de simplification de rédaction des résultats (voir section 3.1), chaque série de test sera identifiée par un libellé spécifique contenant son numéro de série, le delta de température, le nombre d'heures de ralenti nocturne et enfin l'amplitude du surdimensionnement.

Scénarios étudiés				
Série	Libellé	Delta de température	Ralenti nocturne	Surdimensionnement
0	S0-4°C-8h-0%	4°C	8 h	-
1	S1-3°C-8h-0%	3 °C	8 h	-
2	S2-2°C-8h-0%	2 °C	8 h	-
3	S3-3°C-6h-0%	3°C	6 h	-
4	S4-2°C-6h-0%	2 °C	6 h	-
5	S5-3°C-8h-10%	3 °C	8 h	10%
6	S6-3°C-8h-20%	3 °C	8 h	20%
7	S7-3°C-8h-30%	3 °C	8 h	30%
8	S8-3°C-8h-EN	3 °C	8 h	Selon la norme EN12831
9	S9-2°C-8h-EN	2 °C	8 h	Selon la norme EN12831

Tableau 11 Scénarios étudiés pour l'analyse des paramètres de chauffe

À la suite des simulations, plusieurs indicateurs seront étudiés dans le but de définir les différents paramètres de chauffe qui seront utilisés pour l'étude de flexibilité :

- Les degrés-heures d'inconfort, à savoir l'intégration par heure du nombre de degrés de différence en-dessous de la température limite de confort inférieur (19°C)
- Le nombre de jours ayant eu plus de deux heures d'inconfort durant l'occupation du bâtiment
- Le temps de relance pour le jour le plus froid et pour un jour avec une température moyenne
- Le nombre de jours ayant eu plus d'heures de relance durant l'occupation du bâtiment

2.5 Analyse de la flexibilité

La flexibilité de la demande de chauffage du bâtiment type choisi sera étudiée en appliquant différentes stratégies de coupure du chauffage. Nous retrouverons dans cette section la méthodologie qui a été suivie afin de définir ces différents scénarios de coupure ainsi que de la détermination des indicateurs qui nous permettront d'évaluer cette flexibilité. Ces scénarios seront étudiés selon plusieurs variantes à savoir le niveau d'isolation, le type de ventilation mis en place et la masse thermique du bâtiment. Nous détaillerons les différentes configurations utilisées dans le but d'effectuer cette analyse paramétrique.

2.5.1 Scénario de simulation de base et indicateurs étudiés

Comme nous avons déjà pu le voir, la flexibilité du bâtiment dépend de sa capacité à pouvoir déplacer certaines charges électriques à d'autres moments de la journée dans le but d'alléger les réseaux électriques. Plus précisément dans notre cas, il s'agit de déplacer des charges électriques liées à la chauffe du bâtiment tout en restant dans des limites de confort acceptables pour les habitants. Dans ce contexte, nous allons étudier la réaction du bâtiment suite à l'application d'une stratégie de déplacement de charges, en l'occurrence une coupure de chauffage lors d'un pic de consommation sur le réseau.

L'étude se fera sur la période la plus froide de l'année, à savoir la deuxième quinzaine du mois de janvier. En fonction de l'indicateur étudié, nous nous focaliserons soit sur un jour spécifique (P.ex. le jour le plus froid), soit sur des données agrégées pour ces deux semaines. Les pics de consommations ayant généralement lieu entre 17h et 20h en Belgique [73] et entre 18h et 22h en hiver en France [74], une stratégie de coupure du chauffage sera appliquée au bâtiment à 18h pendant une période de 1 à 2 heures. Durant cette coupure, le chauffage se mettra en température de consigne économique. À des fins de simplifications, les différents indicateurs concernant le confort thermique des bâtiments seront étudiés uniquement dans une seule pièce de vie, à savoir le salon. Des indicateurs énergétiques quant à eux seront étudiés sur l'ensemble du bâtiment.

Divers scénarios de base seront analysés afin d'évaluer l'impact des paramètres suivants : la durée de l'arrêt, l'ampleur des gains internes et une préchauffe éventuelle du bâtiment à une température de consigne plus élevée avant la coupure du chauffage. Afin de cibler des scénarios suscitant un intérêt plus important, nous avons procédé par essai-erreur en lançant des tests préalables nous permettant de faire varier ces paramètres. À l'issue des tests effectués par essai-erreur, 4 scénarios ont été retenus pour l'étude que nous retrouvons dans le tableau 12. Notons que la variation du taux d'occupation qui y figure se fait par rapport au paramétrage de base que nous avons fixé dans la section 2.3.3.2. Les libellés mentionnés dans le tableau seront utilisés afin d'identifier les scénarios dans la présentation des résultats (voir section 3.2). La liste des scénarios effectués n'ayant pas été retenus se retrouvent en annexe E.

Scénario	Libellé	Coupure	Gains	Préchauffe
1	S1-2H-100%	Coupure de 2 heures entre 18h et 20h	100% des gains et de l'occupation	Non
2	S2-2H-50%	Coupure de 2 heures entre 18h et 20h	100% des gains et 50% de l'occupation	Non
3	S3-1H-50%	Coupure de 1 heure entre 18h et 19h	100% des gains et 50 % de l'occupation	Non
4	S4-1H-50%-PréCh.	Coupure de 1 heure entre 18h et 19h	100% des gains et 50 % de l'occupation	Oui. Préchauffe d'une heure à une consigne de 1°C supérieur (22°C)

Tableau 12 Les 4 scénarios retenus pour l'étude faisant varier la durée de la coupure, le taux d'occupation du bâtiment et appliquant une période de préchauffe à une consigne de température plus élevée avant la coupure.

Ces 4 scénarios de base seront déclinés selon 3 grandes variantes :

- la couche d'isolation,
- le taux de ventilation
- et l'inertie du bâtiment

Le détail de ces 3 variantes est précisé dans les sections 2.5.2.1, 2.5.2.2 et 2.5.2.3.

Comme déjà évoqué plus haut, deux types d'indicateurs seront étudiés : des indicateurs de confort et des indicateurs énergétiques. Détaillons-les ci-dessous. Notons qu'excepté le premier indicateur de confort (le temps de coupure sans inconfort), les autres indicateurs ont été utilisés dans la thèse de D. Da Silva (« Analyse de la flexibilité des usages électriques : application aux usages thermiques ») [75] et nous semblent intéressants pour mener notre présente étude.

- Le **temps de coupure sans inconfort** permettra d'avoir une première estimation du laps de temps pendant lequel nous pouvons appliquer une stratégie de coupure de chauffage pour le bâtiment étudié. Nous comparerons l'évolution de la température opérative par rapport à l'intervalle de tolérance que nous avons fixé comme contrainte. Cet indicateur pourrait aussi être comparé au temps qu'il faut pour atteindre la consigne basse de température.
- Les **degrés-heures d'inconfort** permettront d'avoir une meilleure idée de l'inconfort provoqué par les coupures de chauffage. Ils seront calculés en intégrant par heure le nombre de degrés en-dessous de la température de confort inférieure acceptable (19°C ou 20°C).
- L'**impact énergétique**¹ ou l'énergie qui n'aura pas été consommée durant la coupure par rapport à un cas de référence sans coupure (voir figure 23)
- La **surconsommation**¹ ou l'énergie que l'on devra dépenser en plus en dehors de la période d'arrêt afin de compenser la baisse de température du bâtiment ou de la pièce causée par la coupure par rapport à un cas de référence sans coupure (voir figure 23)
- Le **recouvrement** étant le rapport entre la surconsommation et l'impact énergétique. Ce dernier indicateur permet d'estimer l'ampleur de la surconsommation par rapport à l'impact énergétique d'un scénario donné.

¹ Pour rappel, aucune PAC n'a été modélisée. Cet indicateur devra être interprété par rapport un système de chauffage avec un rendement de 100%.

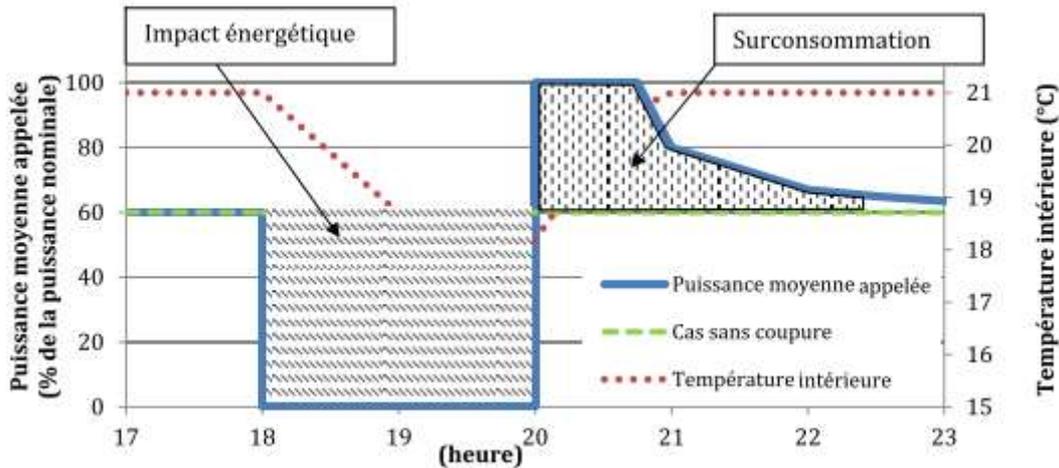


Figure 23 Notions d'impact énergétique et de surconsommation lors de l'application d'une stratégie de coupure[75]

Soulignons que pour évaluer les indicateurs énergétiques, il est nécessaire de calculer un cas de référence sans coupure pour chaque cas envisagé.

Au-delà du paramétrage des différents scénarios, il nous faut encore fixer les contraintes en matière de températures consignes et de limites de températures de confort acceptables. Les températures consignes ont été fixées d'après l'analyse des paramètres de chauffe (voir section 3.1) à savoir 21°C pour la consigne de température haute et 18°C pour la consigne de température basse. La limite basse de la température opérative sera fixée en fonction des tables de PMV (predicted mean vote) de l'étude de Fanger [42] afin d'assurer un confort thermique acceptable à l'occupant. En hiver, le PMV de valeur 0, à savoir qu'en moyenne les occupants trouvent qu'il ne fait ni trop chaud, ni trop froid, est obtenu avec une température opérative de 22°C, un habillement de 1 clo (habillement typique d'hiver), une activité métabolique de 1.2 met (travail léger, assis), 50% d'humidité relative et une vitesse de l'air de 0.15 m/s. À un PMV de 0, on prévoit que le PPD (Predicted percentage of Dissatisfied) est de 5% [76][77]. Si nous baissions la température opérative à 19°C ou à 20°C, toutes choses étant égales par ailleurs, nous obtenons des PMV respectivement de -0.67 (PPD de 15%) et de -0.45 (PPD de 9%) [76][77]. Nous considérons ces 2 dernières valeurs comme étant des limites basses de confort acceptables. Qui plus est, comme elles ont été calculées sur base d'un habillement de 1 clo, un occupant pourrait dès lors décider de s'habiller plus chaudement, lui procurant un confort thermique supérieur

Contraintes	
Température de consigne de confort	21°C
Température de consigne économique	18°C
Température de confort inférieure acceptable	19°C ou 20°C

Tableau 13 Températures consignes et contraintes retenues pour le paramétrage des simulations et du calcul des indicateurs.

2.5.2 Variantes du scénario de base

L'étude de la flexibilité se fera sous l'angle de trois variantes à savoir le niveau d'isolation, la ventilation et l'inertie du bâtiment.

2.5.2.1 Variantes de l'isolation

Le niveau d'isolation du bâtiment influe directement sur les pertes par transmission du bâtiment voire sur le taux d'infiltration. De même, le bâtiment de référence choisi de par ses coefficients de transmission thermique peu performants ($2.45 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ pour les murs externes), est également un bon candidat à la rénovation. Nous étudierons le scénario de base avec sept niveaux d'isolation différents (voir tableau 15) basés sur des épaisseurs différentes d'isolant pour les murs externes, le sol et le toit ; les deux dernières variantes s'appuieront sur l'utilisation de vitrages très performants. L'isolant choisi pour les murs externes ainsi que le toit est de la laine de verre et celui pour le sol est de la mousse de polyuréthane projetée dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau 14. La maison étant mitoyenne, nous appliquerons l'isolation par l'intérieur sur les parois exposées ; les parois internes et mitoyennes resteront non-isolées.

Propriétés des isolants utilisés			
	Coefficient de conductivité thermique [W/m K]	Masse volumique [kg/m ³]	Chaleur spécifique [kJ/kg K]
Laine de verre	0.035	25	0.9
Mousse de polyuréthane projetée	0.025	40	1.4

Tableau 14 Propriétés des isolants utilisés. Valeurs issues de la bibliothèque de matériaux TRNSYS de l'équipe BEMS/ULg

Variantes de niveaux d'isolation						
Niveau d'isolation	U mur externe [W/m ² K]	U Mur toit [W/m ² K]	U sol [W/m ² K]	Vitrage	U [W/m ² K]	G [%]
Pas d'isolation	2.452	3.995	2.296	Double vitrage standard	2.95	0.777
2 cm	1.021	1.217	0.809	Double vitrage standard	2.95	0.777
4 cm	0.645	0.718	0.491	Double vitrage standard	2.95	0.777
6 cm	0.471	0.509	0.353	Double vitrage standard	2.95	0.777
8 cm	0.371	0.394	0.275	Double vitrage standard	2.95	0.777
6 cm	0.471	0.509	0.353	Triple vitrage	0.86	0.598
8 cm	0.371	0.394	0.275	Triple vitrage	0.86	0.598

Tableau 15 Variantes des sept niveaux d'isolation. Coefficients de transmission thermique des différentes parois isolées. Coefficient de transmission thermique U et facteur solaire G du vitrage. Valeurs reprises du logiciel TRNSYS.

En parallèle du niveau d'isolation, une hypothèse sera faite au niveau des taux d'infiltration. Ces derniers peuvent effectivement varier en fonction de l'isolation qui aura été appliquée au niveau des parois externes du bâtiment. Les chiffres typiques de taux d'infiltration à une différence de pression de 50 Pa (n_{50}), sont entre 12 et 4 renouvellements d'air par heure pour un bâtiment non isolé et entre 3 et 7 renouvellements d'air par heure pour des nouveaux bâtiments [78]. Notre hypothèse sera d'appliquer un taux d'infiltration progressivement de moins en moins important en fonction du niveau d'isolation du bâtiment, en passant des chiffres typiques des moins bons taux d'infiltration pour les

maisons non-isolées ($n_{50} = 12 \text{ h}^{-1}$) aux chiffres typiques les meilleurs pour les bâtiments neufs ($n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$) ne faisant pas partie des bâtiments basse-énergie ou passifs. Afin d'obtenir une estimation du taux d'infiltration moyen du bâtiment (ou taux de ventilation saisonnier moyen, n_{sb}) à une différence de pression de 2 Pa, il est d'usage de diviser le n_{50} par 20 [79][80]. Le tableau 16 reprend les différentes valeurs de taux d'infiltration qui seront appliqués en fonction du niveau d'isolation.

Niveau d'isolation	Taux d'infiltration [h^{-1}] n_{sb}
Pas d'isolation	0.6
2 cm	0.5
4 cm	0.3
6 cm	0.2
8 cm	0.16
6 cm + TV	0.16
8 cm + TV	0.15

Tableau 16 Taux d'infiltration moyen (n_{sb}) appliqués en fonction du niveau d'isolation du bâtiment

Les taux d'infiltration appliqués dans les simulations expliquées ci-dessus étant estimés sur base de chiffres typiques de bâtiments non-isolés ou neufs et non sur de vraies mesures, nous vérifierons également l'influence qu'ils peuvent avoir sur la flexibilité d'un cas moyen d'isolation. À cette fin nous testerons les différents taux d'infiltration choisis mais appliqués cette fois sur un niveau d'isolation de 6 cm.

Niveau d'isolation [cm]	Taux d'infiltration [h^{-1}]
6	0.6
6	0.5
6	0.3
6	0.2
6	0.16
6	0.16
6	0.15

Tableau 17 Évaluation de l'influence du taux d'infiltration sur un cas moyen d'isolation

À chaque niveau d'isolation (et taux d'infiltration) correspond un dimensionnement spécifique de la puissance de chauffe. Nous retrouvons l'ensemble de ces dimensionnement dans l'annexe B.

2.5.2.2 Variantes de ventilation du bâtiment

Le deuxième aspect analysé sera l'influence de la ventilation du bâtiment sur la flexibilité de ce dernier. Pour ce faire, nous comparerons un cas de référence sans ventilation avec un cas de ventilation sans récupération de chaleur et enfin un dernier cas avec récupération de chaleur. Un niveau d'isolation moyen sera appliqué au bâtiment, à savoir, une couche de 6 cm et double vitrage (les différentes données concernant l'isolation sont reprises dans la section précédente). Le tableau 18 résume les 3 cas analysés.

Variantes de la ventilation				
Libellé	Isolation [cm]	Infiltration [h-1]	Type de ventilation	Rendement [%]
NoV	6	0.2	Pas de ventilation	-
V_NoHR	6	0.2	Ventilation sans récupération de chaleur	-
V_HR60%	6	0.2	Ventilation avec récupération de chaleur	60%

Tableau 18 Variantes de ventilation

Différents nouveaux paramètres doivent être configurés dans le modèle TRNSYS. Premièrement, les débits de ventilation des différentes pièces. Le dimensionnement des débits de ventilation seront calculés selon la norme D50-001 [81]. L'air sera pulsé dans le salon et dans les deux chambres et sera extrait dans la cuisine, la buanderie ainsi que la salle de bain. La température de l'air pulsé sera celle de l'air extérieur, sauf dans le cas particulier de la ventilation avec récupération de chaleur. Dans ce dernier cas un Type91, modélisant un échangeur de chaleur, calculera cette température sur base de la température de l'air extérieur et la chaleur qu'il aura pu récupérer de l'air extrait du bâtiment. À cette fin, la température de l'air extrait lui sera également fournie en input, valant la moyenne des températures des pièces où l'on extrait l'air pondérée par les volumes de celles-ci. Outre les débits de ventilation qui seront configurés à l'aide du gestionnaire de ventilation dans TRNBUILD, il sera nécessaire de configurer un débit d'air passant des pièces où l'air est pulsé aux pièces où l'air est extrait. Enfin, afin de prendre en compte les nouvelles pertes par ventilation, un nouveau dimensionnement de la puissance de chauffe doit être effectué dans TRNSYS. Nous retrouvons toutes les valeurs débits de ventilation, de circulation d'air et de dimensionnement de puissance de chauffe dans l'annexe C.

2.5.2.3 Variantes d'inertie thermique du bâtiment

Le troisième et dernier aspect envisagé dans l'analyse de la flexibilité de notre bâtiment sera l'aspect de l'inertie thermique du bâtiment. Afin de faire varier ce paramètre, nous envisageons d'ajouter un élément supplémentaire de rénovation dans le bâtiment, à savoir, la pose d'une chape de ciment sur le plancher en bois du premier étage. Nous comparerons le comportement du bâtiment avec le plancher d'origine avec celui bâtiment avec la plancher rénové, et ce sur 2 épaisseurs de chape différentes. Le niveau d'isolation du bâtiment retenu sera toujours notre cas moyen de 6 cm de couche d'isolant avec du double vitrage. Nous retrouvons la composition du plancher rénové dans le tableau 19 ainsi que la description des 3 variantes de scénarios étudiés dans le tableau 20.

Composition du plancher rénové					
Matériau	Épaisseur [m]	Coefficient λ [W / m K]	Chaleur spécifique [kJ / kg K]	Masse volumique [kg / m ³]	Coefficient U [W/m ² K]
Parquet	0.02	0.13	1.6	600	0.951 ou 0.928
Chape de ciment	0.05 ou 0.08	1.15	1	1700	
OSB	0.02	0.13	1.7	500	
Bois	0.06	0.12	1.88	600	
Plaque fibres-gypse		0.32	1.1	1150	

Tableau 19 Composition du plancher rénové avec 2 épaisseurs de chape différentes

Variantes de la masse thermique		
Isolation [cm]	Infiltration [h ⁻¹]	Plancher
6	0.2	Plancher d'origine.
6	0.2	Plancher rénové. Chape de ciment de 5 cm.
6	0.2	Plancher rénové. Chape de ciment de 8 cm.

Tableau 20 Variantes de la masse thermique

Le dimensionnement de la puissance de chauffe utilisé pour les différents cas sera le même que celui utilisé pour dans les variantes d'isolation (couche de 6 cm d'isolant avec un taux d'infiltration de 0.2 h⁻¹). Nous retrouvons ces valeurs en annexe B.

3 Résultats

Nous reprendrons dans cette partie la présentation et l'interprétation des différents résultats obtenus lors des différentes analyses qui ont été menées, que ce soit l'analyse des paramètres de chauffe ou que ce soit l'analyse de flexibilité.

3.1 Résultats de l'analyse des paramètres de chauffe du bâtiment²

Le premier indicateur étudié est le nombre de degrés-heures d'inconfort durant le mois de janvier. Nous le calculons comme étant l'intégration du nombre de degrés de différence entre la température opérative et la borne inférieure de notre intervalle de tolérance (19°C) quand cette dernière lui est supérieure. Cet indicateur est illustré dans les figures 24 et 25 pour les températures consignes de 20°C et 21°C.

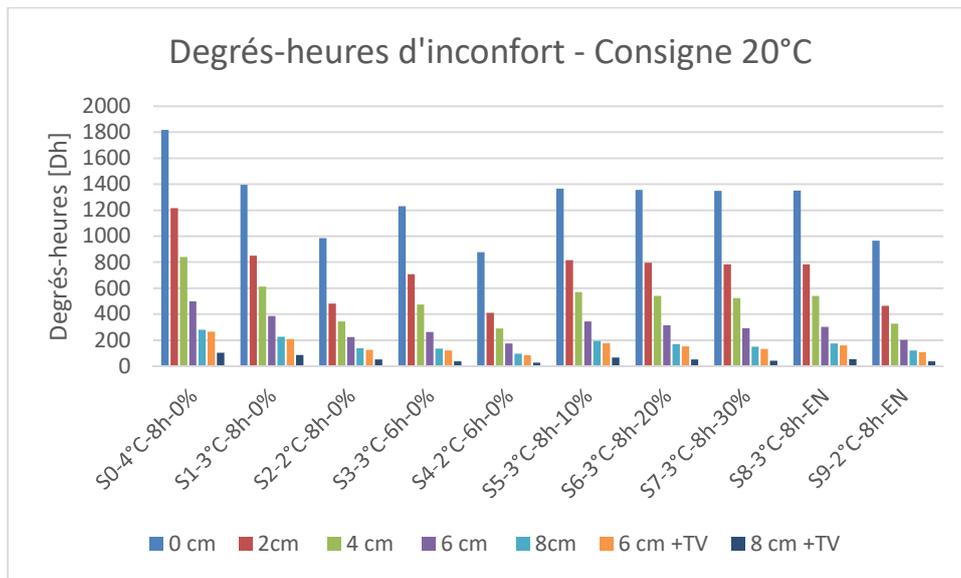
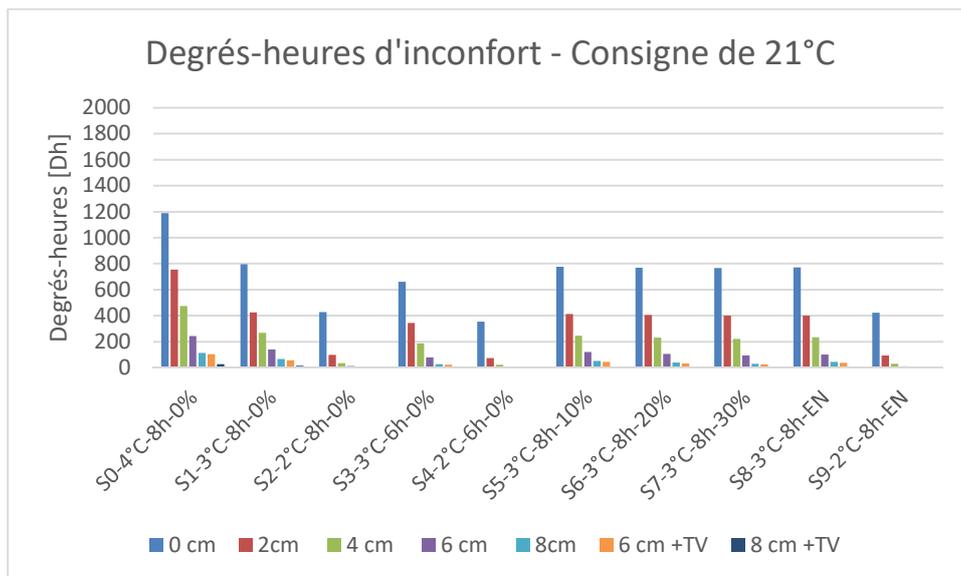


Figure 24 Degrés-heures d'inconfort lors du mois de janvier avec une température de consigne de 20°C.



² Afin de simplifier la présentation et la lecture des résultats, chaque série de test est identifiée par un libellé explicite dont la signification se retrouve dans le tableau 11, page 32.

Figure 25 Degrés-heures d'inconfort lors du mois de janvier avec une température de consigne de 21°C

Les figures 24 et 25 nous permettent de faire les constats suivants :

- Si nous comparons, toutes séries confondues, les résultats obtenus avec la consigne à 20°C et ceux obtenus avec la consigne à 21°C, nous pouvons remarquer que le nombre degrés-heures est nettement supérieur dans le premier cas, une hausse pouvant parfois aller bien au-delà de 100% de degrés-heures en plus. Une température de consigne d'un degré plus bas engendre une hausse importante du nombre de degrés-heures d'inconfort.
- De façon assez attendue, les séries avec un delta de température plus important présentent de plus importants problèmes de confort thermiques. Par rapport au scénario 1 avec un delta de 3°C à une température de consigne de 21°C, le scénario 2 avec un delta de 2°C a en moyenne 40% de degrés-heures en moins, le scénario 0 avec un delta de 4°C a en moyenne une augmentation de 70%. Empêcher de baisser la température de l'air d'un nombre trop important de degrés permet d'éviter de trop descendre en-dessous de notre limite de confort.
- À une température de consigne de 21°C, les différents cas de surdimensionnement ne présentent pas de fortes différences entre eux (de l'ordre de quelques dizaines de degrés-heures d'un cas à l'autre), excepté la série 9 où l'on observe une baisse significative de plusieurs centaines de degrés-heures d'inconfort pour les cas les moins bien isolés; cette dernière n'a en effet qu'un delta de 2°C. Nous observons en général une baisse de moins de 10% de degrés-heures d'inconfort pour les cas avec une surpuissance par rapport à des cas équivalents au niveau du delta et du ralenti mais non-surdimensionnés. À une température de consigne de 20°C, on observe le même phénomène.
- À une température de consigne de 21°C, la comparaison des séries 1 et 3 et des séries 2 et 4 (période de ralenti raccourcis de 2 heures) nous montre que le raccourcissement du ralenti nocturne de 2 heures a un impact non négligeable sur le nombre de degrés-heures d'inconfort. Nous pouvons observer une baisse entre 20 et 30% pour les cas les moins bien isolés, entre de l'ordre de 40 et 70% pour les cas les mieux isolés.

Nous pouvons analyser les problèmes d'inconfort sous un autre angle, à savoir le nombre de jours ayant une situation en inconfort de plus de 2 heures en période d'occupation. Cet indicateur est illustré dans les figures 26 et 27 pour les températures de consignes respectivement de 20°C et 21°C durant le mois de janvier. Encore une fois, si nous comparons les 2 graphiques, nous nous apercevons directement que le cas de la consigne à 20°C présente un plus grand nombre de cas d'inconfort que pour une consigne à 21°C. Le cas du bâtiment non isolé est systématiquement en situation d'inconfort et la moitié de la série 0 (delta de 4°C) en comptent 10 ou plus ; la série 1 (delta 3°C) fait à peine mieux. Les séries avec une surpuissance semblent toutefois diminuer sensiblement les occurrences. Les scénarios avec la consigne à 21°C quant à eux ne présentent que peu de cas d'inconfort. Excepté pour la série 0 (delta de 4°C) où nous remarquons une situation d'inconfort de plus de 2 heures entre 6 et 15 jours pour les variantes les moins bien isolées, les différents scénarios ne présentent que ponctuellement (2 à 4 jours) un problème d'inconfort pour le bâtiment non isolé.

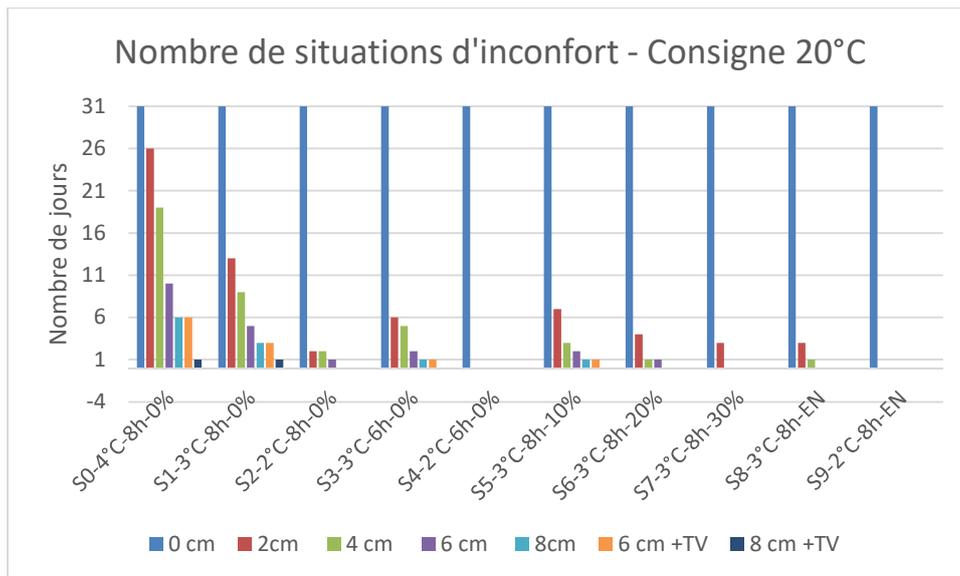


Figure 26 Nombre de jours avec plus de 2h en inconfort lors de l'occupation avec une consigne à 20°C

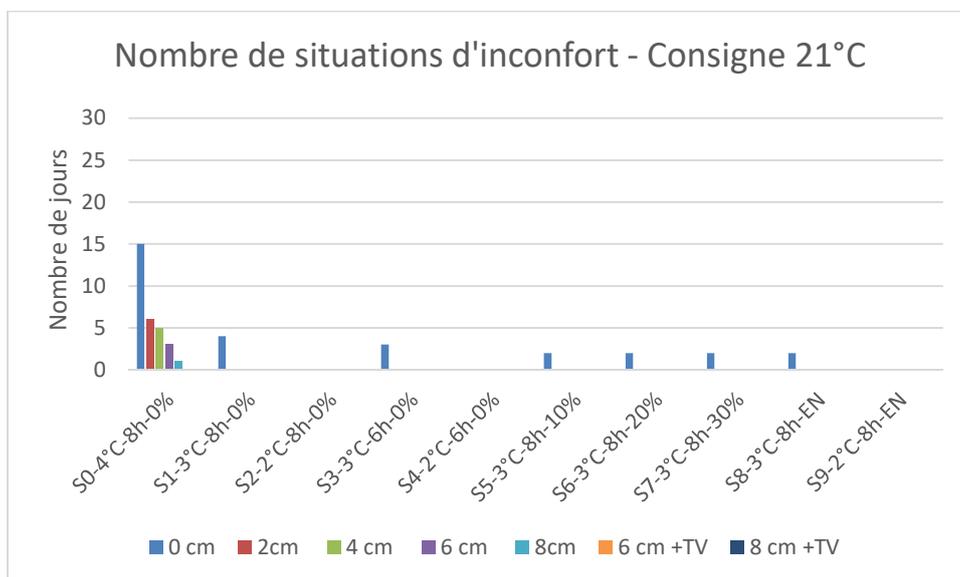


Figure 27 Nombre de jours avec plus de 2h en inconfort lors de l'occupation avec une consigne à 21°C

Nous pouvons à présent étudier le temps de relance pour les différents scénarios. Nous le ferons que pour le cas de 21°C, les résultats obtenus pour une consigne à 20°C étant similaires. En revanche nous le ferons pour le jour le plus froid du mois de janvier (le 15 janvier) et pour un jour dont la température moyenne est proche de la température moyenne du mois de janvier (le 29 janvier).

Pour le jour le plus froid, nous pouvons constater que seules les séries n'ayant qu'un delta de 2°C (séries 2 et 4) et ainsi la plupart des séries ayant une surpuissance (séries de 6 à 9) peuvent assurer une relance dans des temps estimés raisonnables dans notre hypothèse, à savoir 2 heures maximum. Ceci exclut de fait les deux premières séries qui ont des temps de relance bien trop longs et ce pour les différents niveaux d'isolation. Dans toutes séries confondues, le cas non-isolé semble mieux réagir à la relance que les 3 premiers niveaux d'isolation (2, 4 et 6 cm). C'est d'autant plus marqué pour les séries dont la surpuissance de relance a été calculée par ajout de tranches de 10%. Plusieurs

explications pourraient répondre à ce phénomène. De par le dimensionnement propre au cas non isolé, ce dernier bénéficie d'une puissance de chauffe qui équivaut presque au double du cas d'isolation le plus faible (2 cm) (7.7 kW contre 4.2 kW). De même, n'étant pas isolé du tout, il garde toute l'inertie du bâtiment, là où les cas mieux isolés perdent une partie de celle-ci de par l'isolation intérieure. Enfin, pour les 3 cas surdimensionnés par tranche de 10% de puissance, le cas non-isolé, bénéficie d'une surpuissance proportionnellement plus élevée que les autres, le dimensionnement de base étant plus important. Cette dernière affirmation remet dès lors en cause la méthode de surdimensionnement par tranche de 10% de puissance. Les deux cas de surdimensionnement calculés avec la norme EN 12831 obtiennent des résultats similaires aux cas de test avec 2°C de delta de température avec de l'ordre d'une heure de temps de relance. En outre, seuls les cas surdimensionnés permettent de travailler avec un delta de 3°C. De façon générale, si nous observons l'influence de l'isolation sur le temps de relance celui-ci semble surtout réagir aux 3 variantes principales de nos tests à savoir :

- le delta de température, (entre limite haute et basse de la consigne de chauffe)
- la plage de ralenti
- la surpuissance.

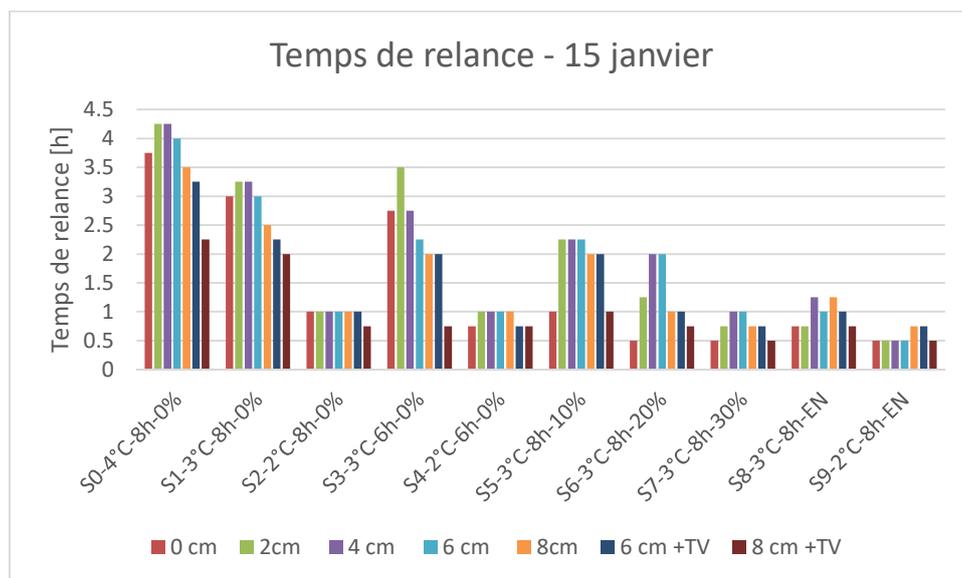


Figure 28 Temps de relance pour le jour le plus froid le 15 janvier

Pour un jour moyen, nous observons que le problème de relance est moins problématique que pour le jour le plus froid. Seule la série avec un delta de 4 °C ne permet pas d'assurer une relance dans les temps impartis pour tous les niveaux d'isolation.

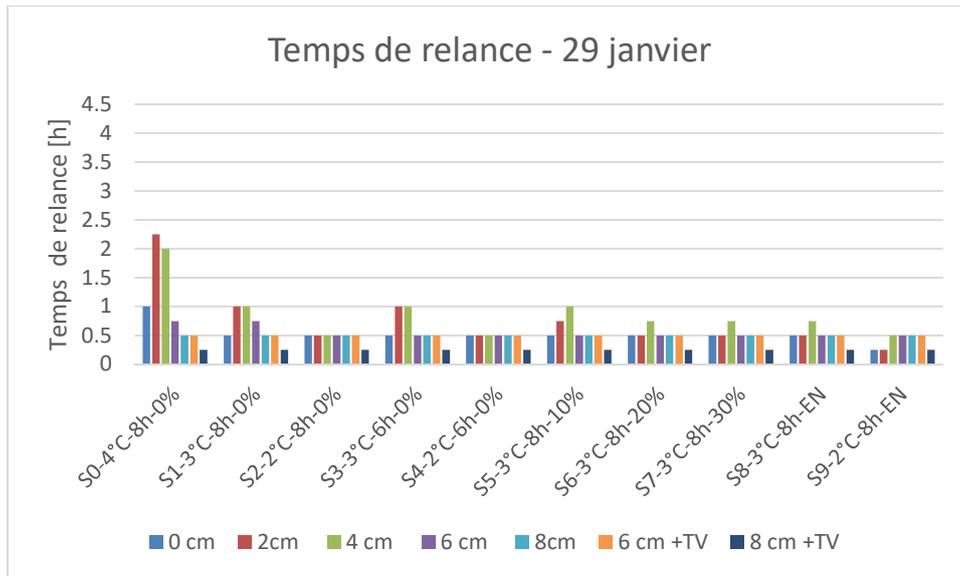


Figure 29 Temps de relance pour un jour à température extérieure moyenne le 29 janvier

Comme nous l'avons fait pour les aspects d'inconfort, analysons le nombre d'occurrences sur le mois de janvier où la relance s'est faite trop lentement (plus de 2 heures) (voir figure 30). Les séries avec les deltas de températures les plus élevés ont le nombre d'occurrences le plus élevé. Nous pouvons noter que ce nombre de jours peut aller au-delà de 15 jours pour la série 0 (delta 4°C). La série 1, présente des relances trop lentes plus de 10 fois sur le mois pour la majorité des niveaux d'isolation. Les séries avec un delta de 2°C (séries 2 et 4) n'ont que 2 à 3 occurrences. Une plage de ralenti raccourcie joue également sur le nombre d'occurrences, mais de façon moins importante qu'une différence de 1°C de delta de température ; certains cas d'isolation atteignent les 10 jours avec un problème de relance dans la série 3. La seule série avec un delta de 3°C n'ayant que ponctuellement une relance trop lente (3 jours ou moins sur le mois) et la seule n'ayant aucune occurrence, sont respectivement les séries 8 et 9, celles-là même où une surpuissance a été calculée selon la norme EN 12831.

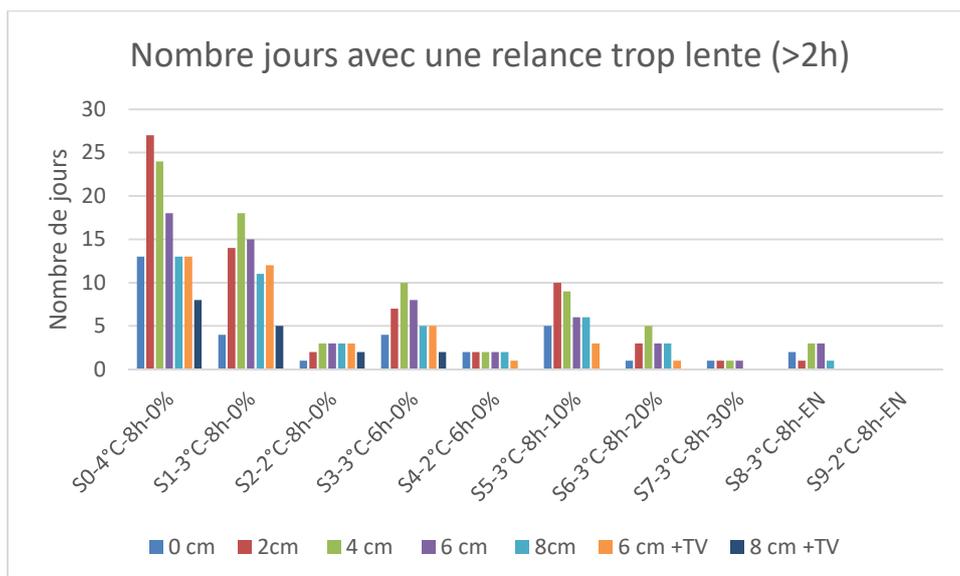


Figure 30 Nombre d'occurrences où la relance était trop lente (plus de deux heures)

En conclusion, tous tests confondus, la série 0 avec un delta de 4°C obtient systématiquement les moins bons résultats, que ce soit en inconfort ou que ce soit en relance. Nous avons également pu observer que la méthode de surdimensionnement par tranches de 10% de puissance peut amener à des situations paradoxales, à savoir que le cas non-isolé (voire même le niveau de 2 cm d'isolation) a une meilleure relance que les autres cas. Les séries avec 2°C de delta et sans surpuissance calculée (séries 2 et 4) obtiennent des résultats bien meilleurs et similaires aux séries avec une surpuissance calculée avec la norme EN 12831. Néanmoins, n'avoir qu'un delta de 2°C pourrait *a priori* limiter la flexibilité de la demande de chauffage du bâtiment, ce qui n'est pas le but recherché dans cette étude. Enfin, réduire la plage de ralenti a un impact mitigé et augmentera de fait la consommation. Si les résultats obtenus au niveau de la relance sont similaires entre les températures de consigne de 20°C et 21°C, la consigne à 20°C nous montre en revanche de nombreux problèmes d'inconfort. Pour ces différentes raisons, nous allons nous orienter vers le cas engendrant le moins de problèmes d'inconfort et de relance avec un delta de 3°C qui correspond à la série 8. Les paramètres et contraintes de chauffe de base retenus sont repris dans le tableau.

Paramètres et contraintes de chauffe	
Température de consigne haute	21°C
Température de consigne basse	18°C
Surdimensionnement	Selon la norme EN 12831
Ralenti nocturne	8h

Tableau 21 Paramètres et contraintes de chauffe retenus

3.2 Résultats de l'analyse de flexibilité

Nous présenterons et interpréterons dans les sous-sections suivantes les résultats liés aux scénarios de coupure et de leurs 3 grandes variantes (isolation, ventilation et inertie). Les analyses paramétriques ayant été automatisées, le nombre de résultats est par conséquent fort important. De ce fait, nous ne pourrions pas étudier en détail la totalité des résultats, nous nous concentrerons sur une sélection de résultats étant jugés comme les plus importants. De même, afin de limiter les explications redondantes au travers des 3 variantes, la variante isolation sera analysée plus en profondeur que les 2 autres. Nous nous contenterons dans ces 2 dernières variantes d'analyser les éléments neufs et de les étudier de façon comparative à la première variante.

3.2.1 Scénarios avec les variantes d'isolation³

3.2.1.1 *Le temps sans inconfort durant la coupure*

Nous allons procéder en deux étapes afin d'analyser le temps sans inconfort durant la coupure. En un premier temps, nous allons étudier en détail les différents paramètres qui peuvent influencer ce temps sans inconfort à savoir : le niveau d'isolation, la température extérieure, la stratégie de coupure et le taux d'infiltration. En un deuxième temps, nous passerons en revue les indicateurs statistiques (moyenne, écart-type, minimum et maximum) sur l'ensemble des scénarios étudiés. Comme évoqué dans la méthodologie, les résultats de confort thermique sont interprétés par rapport à 2 températures opératives limites acceptables qui sont 19°C et 20°C.

La figure 49 nous montre l'évolution de la température opérative pour les 7 niveaux d'isolation différents après la mise en œuvre de la stratégie de coupure du scénario 1 (coupure de 2 heures, gains complets) le jour le plus froid. En pointillé, nous retrouvons nos deux limites de températures de confort : 19°C et 20°C. La coupure de chauffage a lieu à 18h00. Entre 18h00 et 0h00, la température externe évolue de -10.5°C à -9.5°C.

³ Afin de simplifier la présentation et la lecture des résultats, chaque série de test est identifiée par un libellé explicite dont la signification se retrouve dans le tableau 12, page 34.

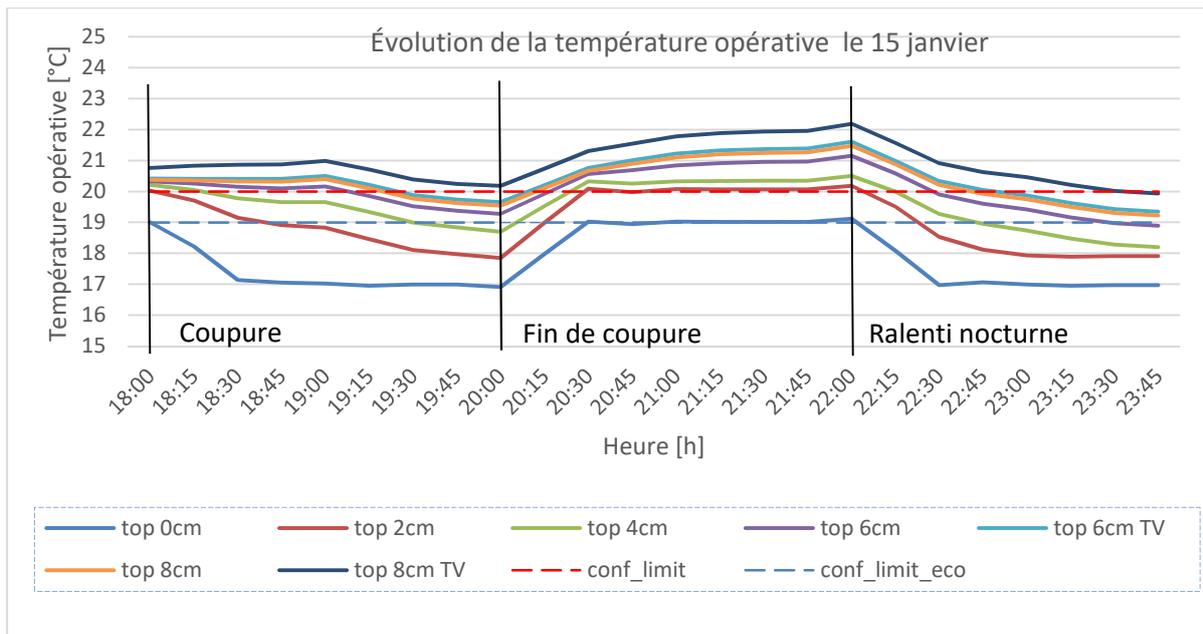


Figure 31 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier. Comparaison des différents niveaux d'isolation.

D'entrée de jeu, nous pouvons observer que le cas sans isolation ne permet pas de maintenir un niveau de confort acceptable. Au moment de la coupure, la température opérative se trouve déjà à la limite basse de confort, à savoir 19°C, et chute à 17°C en à peine une demi-heure, moment où la température de l'air atteint 18°C, qui est notre consigne de température économique. Autrement dit, la coupure engendre instantanément de l'inconfort et provoque une remise en marche du chauffage en consigne économique dans la pièce étudiée (seul variante d'isolation ayant présenté une remise en marche du chauffage dans le salon).

Les 2 niveaux d'isolation les plus faibles (2 cm et 4 cm) ont quant à eux une température opérative proche de 20°C au moment de la coupure. Si le cas de 4 cm tient un quart d'heure au-dessus de 20°C et 1h30 au-dessus de 19°C, le cas à 2 cm quant à lui présente rapidement des problèmes d'inconfort thermique; il passe instantanément en-dessous de 20°C et à peine 30 minutes après en-dessous des 19°C.

Les trois cas d'isolation suivants (6 cm, 8 cm et 6 cm +TV) commencent la coupure à une température opérative proche des 20,3°C, atteignent la limite des 20° entre 1h15 et 1h30 d'arrêt pour terminer à une température d'environ 19,5°C en fin coupure. Enfin, le cas d'isolation le plus élevé (8 cm et triple vitrage) a une température opérative proche des 21°C au moment de la coupure et atteint une température proche des 20°C, voire au-delà, après deux heures d'arrêt. Dans notre scénario de coupure, ce cas ne présente donc pas de problème d'inconfort thermique, et ce pour les 2 températures limites de confort envisagées.

En analysant de plus près les 3 meilleurs cas d'isolation, nous pouvons remarquer que juste après la coupure, la température opérative monte très légèrement jusqu'à 19h. La baisse de température opérative qui suit 19h correspond à une occupation différente du bâtiment, qui procure moins de gains internes dans la pièce du salon. Ce phénomène montre l'importance des gains internes dans les cas les mieux isolés. Le changement d'occupation de la pièce est également visible dans les autres cas d'isolation, traduit ici par une accélération de la chute de température. Le tableau 22 résume la

moyenne des différentes vitesses de chute de température opérative sur les deux heures de coupure.

Vitesse de chute de température opérative moyenne observée [°C/h]						
top 0 cm	top 2 cm	top 4 cm	top 6 cm	top 6 cm+TV	top 8 cm	top 8 cm+TV
2.6 (*)	1.1	0.8	0.5	0.4	0.4	0.3

Tableau 22 Chutes de température moyennes durant la coupure pour les différents cas d'isolation le 15 janvier. (*) Moyenne calculée sur 45 min pour le cas non-isolé, qui correspond au temps pour atteindre la température minimale.

La reprise après la coupure nous montre que les différents cas les moins bien isolés peuvent toujours présenter des problèmes de confort thermique. Il faut compter une demi-heure au cas non-isolé pour arriver à une température opérative de 19°C (cela n'ira pas plus haut). Une demi-heure également pour les niveaux d'isolation de 2 et 4 cm, mais pour arriver à une température opérative de 20°C ou légèrement au-delà.

Du point de vue de la rénovation du bâtiment, nous remarquons sur ce premier cas de figure qu'en dessous de 6 cm d'isolation les problèmes d'inconfort thermique sont rapidement présents (voire même sans coupure pour le cas non-isolé). La pose de triple vitrage a un impact important sur le confort thermique, diminuant de moitié la vitesse de chute de température dans nos scénarios. Nous remarquons que l'isolation de 6 cm avec du triple vitrage est légèrement plus performant que l'isolation de 8 cm avec du double vitrage, au vu de l'évolution de la température opérative.

La figure 32 nous montre l'évolution de la température opérative après une coupure de 2 heures avec l'ensemble des gains, un jour se situant dans la moyenne des températures de la période étudiée (près des 0°C en moyenne). Entre 18h00 et 0h00, la température externe évoluera de 2.4°C à 1.6°C. Le comportement des différents niveaux d'isolation est similaire à ce que l'on a pu observer dans le cas précédent, si ce n'est que les températures opératives en début de coupure sont supérieures (jusqu'à une différence de 1°C pour le cas le mieux isolé), et que la diminution de température durant la coupure est plus lente (voir tableau 23). Nous n'observons plus de problèmes d'inconfort durant toute la durée de la coupure à partir d'un niveau d'isolation de 6 cm avec double vitrage. Si nous observons globalement moins d'inconfort thermique dû à la coupure lors d'un jour à température moyenne, les températures opératives les plus chaudes obtenues pour le cas le mieux isolé (8 cm et triple vitrage) se situent à 23.5°C. Nous pourrions donc arriver à des situations d'inconfort dues à des surchauffes.

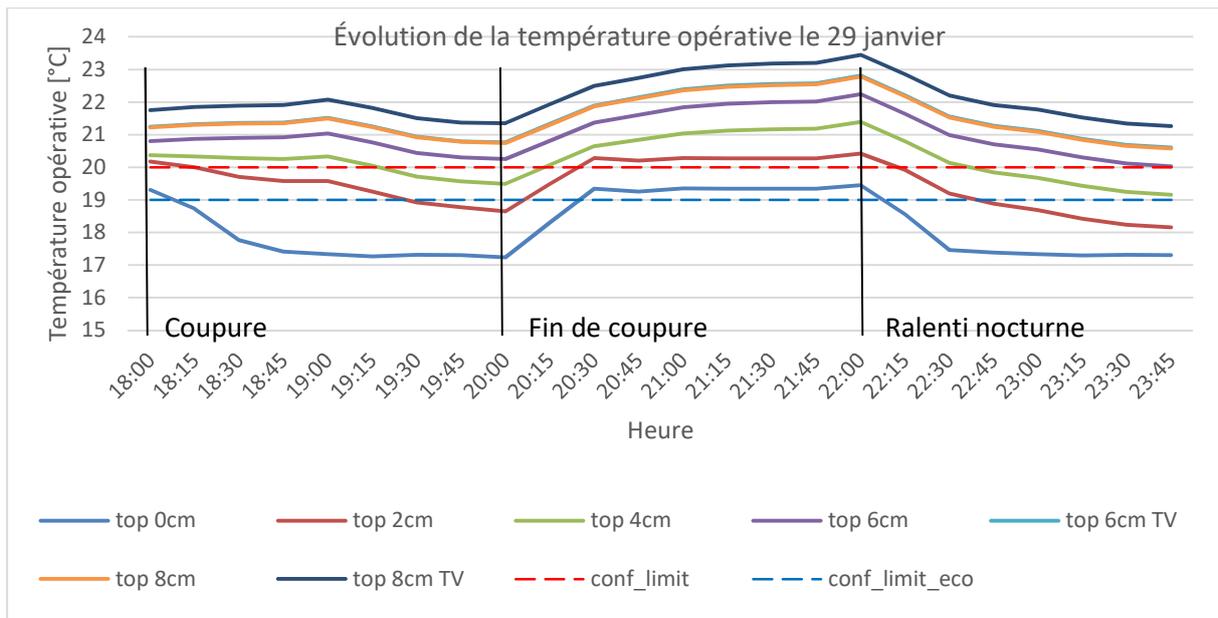


Figure 32 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure un jour moyen : le 29 janvier. Comparaison des différents niveaux d'isolation.

Vitesse de chute de température opérative moyenne observée [°C/h]						
top 0 cm	top 2 cm	top 4 cm	top 6 cm	top 6 cm+TV	top 8 cm	top 8 cm+TV
2.0 (*)	0.8	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2

Tableau 23 Chutes de température moyennes durant la coupure pour les différents cas d'isolation le 29 janvier. (*)Moyenne calculée sur 1h pour le cas non-isolé, qui correspond au temps pour atteindre la température minimale.

La figure 33 illustre l'évolution de la température opérative en comparant l'impact des 4 stratégies de coupure de chauffage le jour le plus froid pour un niveau d'isolation moyen (6 cm avec double vitrage). La température opérative en début de coupure des 3 premiers scénarios est de l'ordre de 20.2°C contre 20.8°C pour le dernier dans lequel une préchauffe à 22°C a été appliquée.

Le scénario 1 met 1h15 pour descendre en-dessous des 20°C et atteint la température opérative de 19.3°C en fin de coupure, soit une diminution de 0.9°C durant le temps de la coupure. Si nous comparons au scénario 2, la température opérative de 20°C est atteinte à peine un quart d'heure après l'arrêt du chauffage, elle est de 19°C 1h30 après la coupure et descend jusqu'à 18.5°C en fin de coupure (soit une diminution de 1.7°C sur le temps de la coupure). Le scénario 2 nous montre des problèmes de confort thermique plus marqués que le précédent selon la limite de confort que l'on choisit (19°C ou 20°C) avec pour cause une occupation moindre du salon, le premier scénario ne présentant pas de problèmes d'inconfort à la limite de 19°C.

Réduire le temps de coupure à 1h permet aux scénarios avec une occupation partielle de réduire d'une part le temps en inconfort et d'autre part d'éviter de passer en-dessous de notre température limite basse de confort (19°C). C'est ce que nous montre le scénario 3. En revanche, le temps sans inconfort à la limite de 20°C, ainsi que l'évolution de la température opérative jusqu'à 19h, est très logiquement le même que le scénario 2. Afin d'augmenter encore plus ce temps sans inconfort, appliquer une période de préchauffe à une température de consigne plus élevée de 1°C pendant une heure avant la coupure semble avoir un impact, tel que montré dans le scénario 4. Premièrement, nous débutons la

période de coupure à une température opérative plus élevée (proche des 21°C) et deuxièmement nous obtenons un temps sans inconfort de 30 min à la limite de confort de 20°C (contre 15min dans les scénarios 2 et 3). La préchauffe a permis de monter la température de l'air à 22°C et en moyenne les parois ont une température plus haute de 0.44°C comparé à un cas sans préchauffe, soit en moyenne 20.11°C. Toutefois, la variation de la température opérative est plus importante durant la coupure dans ce dernier cas. Nous observons une diminution de 1.18°C durant la coupure contre 0.7°C dans le scénario 3, montrant qu'à une température plus élevée, les pertes sont plus importantes.

Au moment de la reprise du chauffage, nous remarquons que le scénario 2 met une demi-heure pour passer au-delà de la limite de confort de 20°C contre un quart d'heure dans les autres cas. Les 3 cas avec une occupation partielle atteignent la température opérative de 20.4°C avant le ralenti nocturne contre 21.3°C avec une occupation complète mettant une fois de plus en évidence l'impact important des gains internes sur le confort thermique.

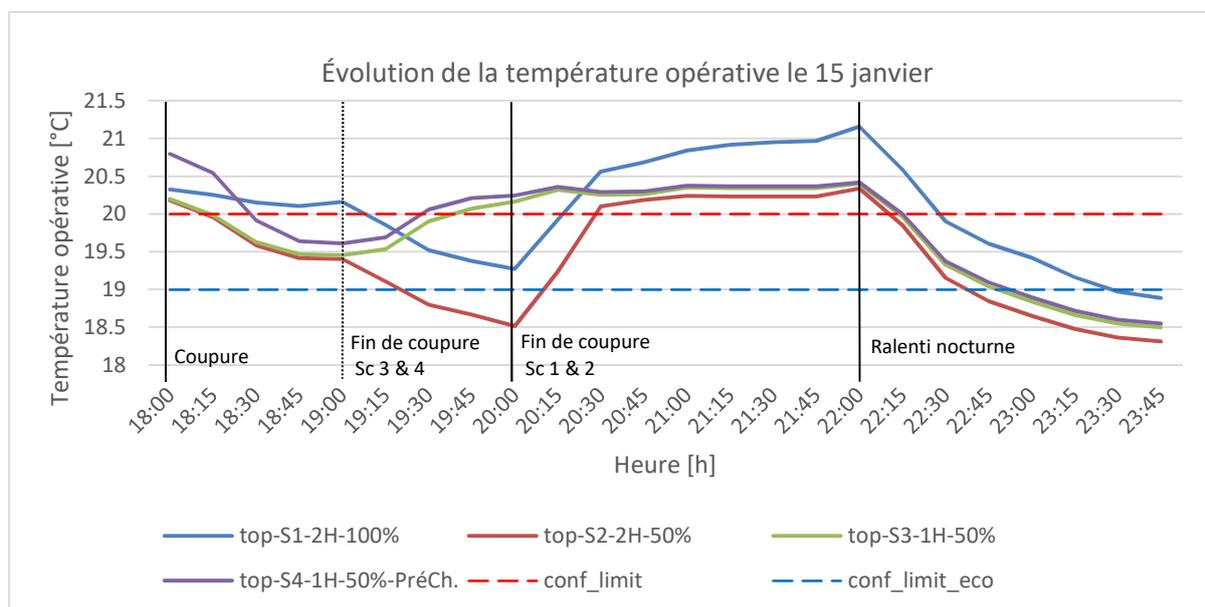


Figure 33 Évolution de la température opérative des 4 scénarios de coupure pour un cas moyen d'isolation (6 cm et double vitrage). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier.

Enfin, la figure 34 nous montre l'influence que peut avoir différents taux d'infiltration dans la maison avec le niveau d'isolation moyen de 6 cm et le double vitrage lors d'une coupure de 2 heures avec 100% d'occupation et ce le jour le plus froid. Nous observons sans grande surprise que les variations de températures durant la coupure sont plus élevées dans les cas d'une plus forte infiltration. Les différents cas envisagés ont tous une température opérative proche de 20.4°C au moment de l'application de la coupure. Le taux d'infiltration le plus élevé (0.6 h^{-1}) chute de 1.68°C pendant les deux heures contre 0.83°C pour le taux le plus faible (0.15 h^{-1}), soit environ le double. Là où les 2 moins bons taux d'infiltrations ont un temps sans inconfort d'une demi-heure à la limite de 20°C, les autres cas tiennent entre 1h et 1h15. Ce sont également les 2 seuls cas à passer en-dessous de la limite de confort de 19°C après 1h45. De façon attendue, nous pouvons également remarquer que les températures opératives obtenues après la relance sont légèrement plus basses et stagnent vers les 20.5°C pour ces 2 cas contre de l'ordre de 21.2°C pour les meilleurs cas.

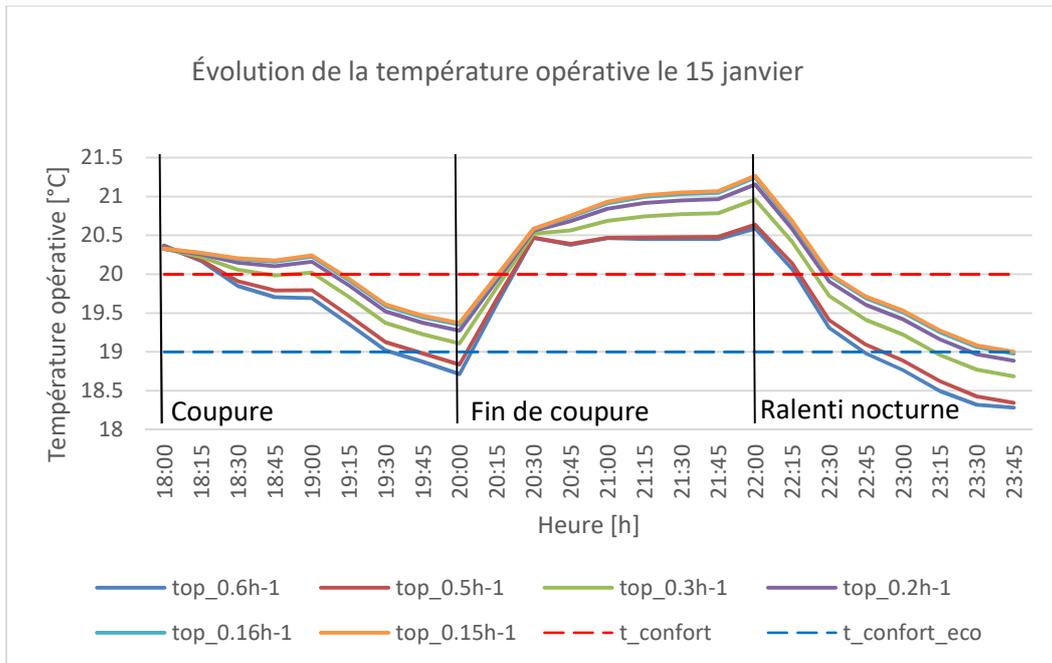


Figure 34 Évolution de la température opérative avec 6 variantes d'infiltration pour un cas moyen d'isolation (6 cm et double vitrage). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier.

Après avoir analysé les différents paramètres influençant le temps sans inconfort durant la coupure, le tableau 24 nous détaille quelques valeurs statistiques de cet indicateur, telles que la moyenne, l'écart-type et la valeur minimale et maximale, et ce pour nos 2 températures opératives limites de confort de 19°C et de 20°C. La première chose qui retient notre attention dans ce tableau est la grande différence des résultats entre les 2 limites de confort. Pour la plupart des scénarios une isolation de 4 à 6 cm suffit pour ne pas tomber en inconfort en-dessous des 19°C durant la coupure. En revanche à la limite de confort de 20°C seuls les scénarios 1 et 4 avec la meilleure isolation (isolation de 8 cm avec triple vitrage) ne présentent aucun inconfort.

Temps sans inconfort lors de la coupure										
Scénarios Nomenclature : (« Réf- coupure- gain interne- préchauffe »)			Confort 19°C				Confort 20°C			
			Temps [h]				Temps [h]			
Scén.	Isol [cm]	Vitrage	Moy	ÉT	Min	Max	Moy	ÉT	Min	Max
S1-2H-100%		DV	0.3	0.1	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
		2 DV	1.6	0.4	0.8	2.0	0.6	0.5	0.3	1.8
		4 DV	2.0	0.1	1.5	2.0	1.3	0.6	0.5	2.0
		6 DV	2.0	0.0	2.0	2.0	1.8	0.3	1.3	2.0
		8 DV	2.0	0.0	2.0	2.0	1.9	0.2	1.5	2.0
		6 TV	2.0	0.0	2.0	2.0	1.9	0.2	1.5	2.0
		8 TV	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0
S2-2H-50%		DV	0.3	0.1	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
		2 DV	1.2	0.5	0.5	2.0	0.3	0.3	0.0	1.3
		4 DV	1.7	0.3	1.0	2.0	0.7	0.6	0.3	2.0
		6 DV	1.9	0.2	1.5	2.0	1.2	0.7	0.3	2.0
		8 DV	2.0	0.1	1.5	2.0	1.3	0.6	0.5	2.0
		6 TV	2.0	0.1	1.8	2.0	1.3	0.6	0.5	2.0
		8 TV	2.0	0.0	2.0	2.0	1.6	0.5	0.5	2.0
S3-1H-50%		DV	0.3	0.1	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
		2 DV	0.9	0.2	0.5	1.0	0.3	0.3	0.0	1.0
		4 DV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.6	0.3	0.3	1.0
		6 DV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.8	0.3	0.3	1.0
		8 DV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0
		6 TV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0
		8 TV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.1	0.5	1.0
S4-1H-50%-PréCh.		DV	0.4	0.1	0.3	0.5	0.1	0.1	0.0	0.3
		2 DV	1.0	0.1	0.8	1.0	0.6	0.2	0.5	1.0
		4 DV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.8	0.2	0.5	1.0
		6 DV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0
		8 DV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0
		6 TV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0
		8 TV	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0

Tableau 24 Valeurs moyennes (et écarts-types), minimales et maximales des temps sans inconfort lors de la coupure pour les variantes d'isolation. Chiffres pour une température limite de confort à 19°C et à 20°C.

Détaillons à présent le comportement du temps sans inconfort dans les différents niveaux d'isolation. Le cas sans isolation ne tient en moyenne que moins d'une demi-heure même à la limite basse de 19°C et est instantanément en inconfort à la limite de 20°C. En appliquant ne fût-ce qu'une couche d'isolation de 2 à 4 cm, nous pouvons déjà remarquer une hausse notable du temps sans inconfort à la limite de 19°C montant jusqu'à un temps moyen de plus d'une heure. En revanche, à la limite des 20°C, le temps moyen de ces deux premiers niveaux d'isolation chute rapidement, surtout dans les scénarios avec une occupation partielle. L'indicateur peut descendre dans ce cas jusqu'à une demi-heure, voire moins selon les scénarios de coupure.

À partir de 6 cm d'isolation avec double vitrage, les résultats deviennent globalement très satisfaisants. La température opérative ne descend pas en-dessous de la limite de confort de 19°C durant les coupures dans la grande majorité des cas. À la limite de 20°C, les valeurs moyennes du temps sans inconfort sont proches du temps de coupure pour l'ensemble des niveaux d'isolation, excepté pour le scénario 2. Dans ce cas, la coupure de 2 heures avec un taux d'occupation partiel du bâtiment impacte les valeurs moyennes des temps sans inconfort, ceux-ci restant entre 1h12 et 1h34, pour les niveaux d'isolation de 6 cm et au-delà. Si les valeurs minimales de ces cas d'isolation sont en général proche du temps de coupure à la limite de 19°C, elles peuvent néanmoins descendre à une demi-heure voire un quart d'heure à la limite des 20°C. Nous constatons également plus de dispersion des valeurs dans ce deuxième scénario que dans les autres séries.

Si nous analysons l'indicateur d'un scénario de coupure à l'autre, nous observons les mêmes tendances qu'observées précédemment dans le graphique de la figure 33. Le confort thermique sera mieux assuré avec des gains internes plus importants, avec une coupure moins longue et avec une éventuelle période de préchauffe avant la coupure. Notons que la dispersion des valeurs est de façon générale plus importante dans les cas d'isolation plus faibles, dans les scénarios de coupure plus longue et dans les scénarios d'occupation plus faible.

3.2.1.2 Les degrés-heures d'inconfort

Étudiés à présent les degrés-heures d'inconfort générés par les différents scénarios de coupure. Pour rappel, les degrés-heures ont été calculés sur l'ensemble des journées des 2 semaines étudiées, et non pas uniquement durant la coupure. Dans cette section, nous nous restreindrons à la limite de confort de 20°C de température opérative. Comme illustré dans la figure 35, nous comparerons les 4 scénarios (Sc. 1 à 4) de coupures avec un scénario de référence sans coupure (« Sc. Réf. »). Vu le nombre de degrés-heures élevé obtenus, ne fût-ce que dans le cas de référence, il est utile de préciser que le bâtiment n'est chauffé que pendant 9 heures par jour en semaine et 14 heures par jour le week-end à la température de consigne de confort (21°C), le reste du temps le bâtiment est chauffé à la température de consigne économique de 18°C. Cette situation pouvant de fait provoquer un nombre de degrés-heures élevé si nous les comptabilisons sur l'ensemble de la journée.

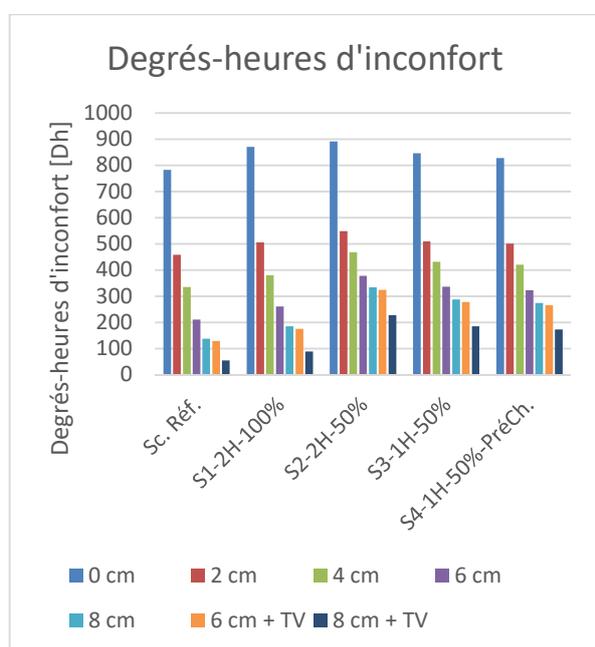


Figure 35 Degrés-heures d'inconfort observés dans les différents scénarios de coupure et de niveaux d'isolation

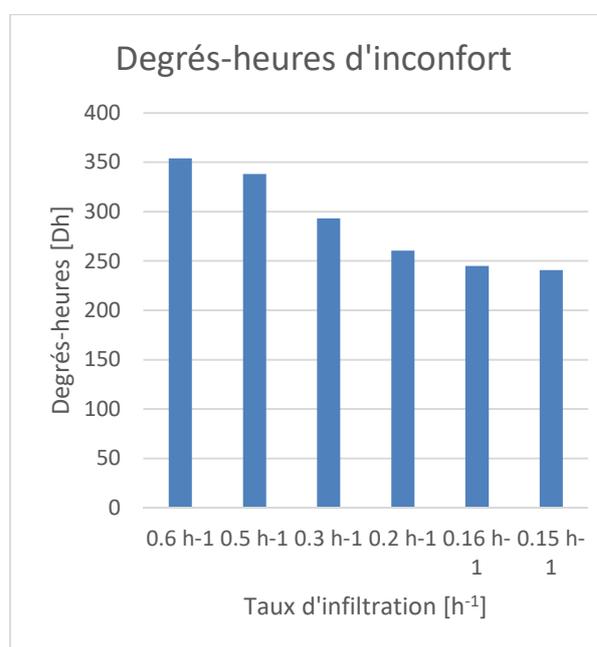


Figure 36 Degrés-heures d'inconfort observés pour différents taux d'infiltration. Scénario1 (coupure de 2 heures, gains complets). Cas d'isolation moyen (6 cm et double vitrage).

Sans grande surprise, si nous analysons le scénario de référence sans coupure, le cas non-isolé présente un nombre de degrés-heures très élevé (782 degrés-heures). Ce nombre chute ensuite très rapidement dans les niveaux successifs d'isolation. Nous sommes près de 210 degrés-heures (à savoir pratiquement 27% du cas non-isolé) avec une isolation de 6 cm avec double vitrage et aux alentours de 55 Dh pour la meilleure isolation (moins de 10% du cas non-isolé).

Dans le premier scénario avec une coupure de 2 heures, nous pouvons observer une hausse attendue du nombre de degrés-heures. Comparé au scénario de référence sans coupure, nous montons à présent à près de 870 Dh (+11%) pour le cas non-isolé, 260 Dh (+24%) pour le cas de 6 cm d'isolation et à un peu plus de 88 Dh (+62%) pour le meilleur cas. Si proportionnellement les meilleures niveaux d'isolation ont augmenté le plus de degrés-heures, les chiffres absolus sont plus importants avec les moins bonnes isolations. La hausse de l'inconfort thermique tel qu'observée dans le cas non-isolé (+ 5,5 Dh/j en moyenne) témoigne d'une durée d'inconfort plus longue (la relance est plus lente) avec une chute de température plus importante lors de la coupure. L'augmentation des degrés-heures dans

le meilleur cas d'isolation quant à elle correspond à un peu moins de 2 degrés-heures par jour en moyenne. Au vu de l'étude du temps sans inconfort, ces degrés-heures sont survenus au cours des ralentis nocturnes et non durant la coupure. Au sein du premier scénario, la chute de degrés-heures au travers des différents niveaux d'isolation reste quant à elle grosso modo dans les mêmes proportions que le scénario de référence.

Le scénario 2, présentant des taux d'occupation de 50% par rapport au premier scénario de coupure, subit une hausse des degrés-heures par rapport au scénario de référence encore plus importante que dans le cas précédent. Le cas non-isolé présente 890 degrés-heures (+14%) pour près de 380 (+81%) dans le cas 6 cm et encore 226 (+318%) pour le meilleur cas. Au sein de ce même scénario, nous observons une tendance moins marquée de la chute des degrés-heures entre les niveaux successifs d'isolation. Le niveau d'isolation de 6 cm et le meilleur niveau d'isolation ont respectivement un nombre de degrés-heures valant 42% et 25% de celui du cas non-isolé. La baisse des gains internes liés à l'occupation partielle a un impact sur le nombre de degrés-heures du scénario de coupure. Cet impact est proportionnellement d'autant plus important pour les niveaux d'isolation les plus élevés.

Par rapport au scénario de référence, les scénarios 3 et 4 ont tous les deux des situations intermédiaires aux scénarios 1 et 2 quant au nombre de degrés-heures relevé. Nous n'analyserons donc pas les résultats obtenus par rapport au cas de référence, ni l'évolution des degrés-heures en fonction des niveaux d'isolation pour ces scénarios. Il est toutefois intéressant de comparer les chiffres obtenus par rapport à ceux du scénario 2 afin de voir dans quelle mesure une coupure moins longue, avec ou sans préchauffe, peut avoir un impact. Tout niveau d'isolation confondu, une coupure d'une heure permet en moyenne de diminuer de 42.5 degrés-heures (écart-type de 3.6 Dh), ce qui correspond en gros à une heure et demie avec 1.5°C de différence par rapport à la limite de 20°C sur la période de 16 jours. Quand cette coupure d'une heure est précédée par une période de préchauffe d'une heure à une température de consigne d'un degré plus élevé (22°C) le nombre de degrés-heures diminue encore à en moyenne 55.5 Dh, tout niveau d'isolation confondu (écart-type de 5.8 Dh). Proportionnellement au nombre de degrés-heures du scénario 2, cette baisse se fait surtout ressentir dans les niveaux d'isolation les plus élevés.

Pour terminer, la figure 36 nous présente les degrés-heures d'un cas moyen d'isolation (6 cm et double vitrage) en tenant compte de différents taux d'infiltration lors d'un scénario de coupure de 2h avec 100% d'occupation. Une variante se basant uniquement sur le taux d'infiltration nous montre qu'il peut y avoir de grandes différences au niveau du nombre de degrés-heures d'inconfort calculés dans le modèle. Ainsi nous pouvons remarquer une différence de plus 110 degrés-heures entre le moins bon taux d'infiltration (0.6 h⁻¹) et le meilleur (0.15 h⁻¹) passant de 354 à 241 degrés-heures. Le cas moyen d'isolation de 6 cm, ayant une infiltration habituellement de 0.2 dans les autres tests, obtient 260 degrés-heures ; résultat fort proche de ceux obtenus pour les taux d'infiltration les plus faibles. Ceci illustre l'importance de l'impact du taux d'infiltration sur les différents paramètres étudiés dans nos simulations.

3.2.1.3 L'impact énergétique ⁴

Avant de commenter l'impact énergétique à proprement parler, ainsi que tous les autres indicateurs énergétiques, il est utile de pouvoir situer la consommation du bâtiment en fonction de son niveau d'isolation car celle-ci va influencer sur ces indicateurs. Nous retrouvons dans le tableau 25 les consommations annuelles (sans et avec gains internes) de même que les consommations quotidiennes moyennes durant la période étudiée.

Besoins du bâtiment en fonction du niveau d'isolation							
	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	6 cm + TV	8 cm + TV
Annuels [MWh]	27.8	14.2	9.6	7.4	6.1	6.4	5.3
Annuels (avec gains internes) [MWh]	23.6	10.2	5.8	3.7	2.7	2.8	2.0
Quotidiens moyens sur période étudiée [kWh]	104.4	49.2	30.3	21.2	16.4	16.6	12.8

Tableau 25 Besoins du bâtiment en fonction de son niveau d'isolation. Consommation annuelle, consommation annuelle tenant compte des gains internes et consommation quotidienne moyenne durant la période étudiée.

Pour rappel, l'impact énergétique est l'énergie qui ne sera pas consommée durant la coupure par rapport à un scénario de référence sans coupure. La figure 37 représente l'impact énergétique quotidien moyen sur la période étudiée pour les différents scénarios et niveaux d'isolation envisagés. Si nous prenons le premier scénario, nous pouvons apercevoir que l'impact énergétique diminue avec le niveau d'isolation du bâtiment. Ceci est somme toute le comportement attendu; les cas les moins bien isolés ont une consommation plus élevée en cas de non coupure pour contrer les déperditions par transmission et par ventilation. De même, nous voyons que la diminution de l'impact se fait surtout ressentir sur les premiers niveaux d'isolation pour se tasser ensuite sur les 3 meilleurs niveaux. Ceci s'explique par le fait que les niveaux d'isolation successifs font chuter les coefficients de transmission thermique des parois de la même manière. Le cas non-isolé a un impact énergétique de 7 kWh, entre 2 cm et 6 cm d'isolation, il passe de 5.3 kWh à 3.2 kWh (respectivement 76% et 46% du cas non-isolé) et pour les derniers cas d'isolation il stagne entre 2.6 kWh et 2.2 kWh (respectivement 37% et 31% du cas non-isolé). Comparé à la consommation quotidienne moyenne, l'énergie qui n'est pas dépensée durant la coupure est de l'ordre de 7% pour le cas non-isolé, entre 11 et 13% pour les niveaux d'isolation les plus bas, 15 % pour le niveau d'isolation de 6 cm et enfin entre 16 et 17% pour les cas restants.

⁴ Pour rappel, l'impact énergétique qui est discuté dans cette section se fait par rapport à un système de chauffage avec un rendement de 100%, aucun COP n'est pris en compte dans les résultats.

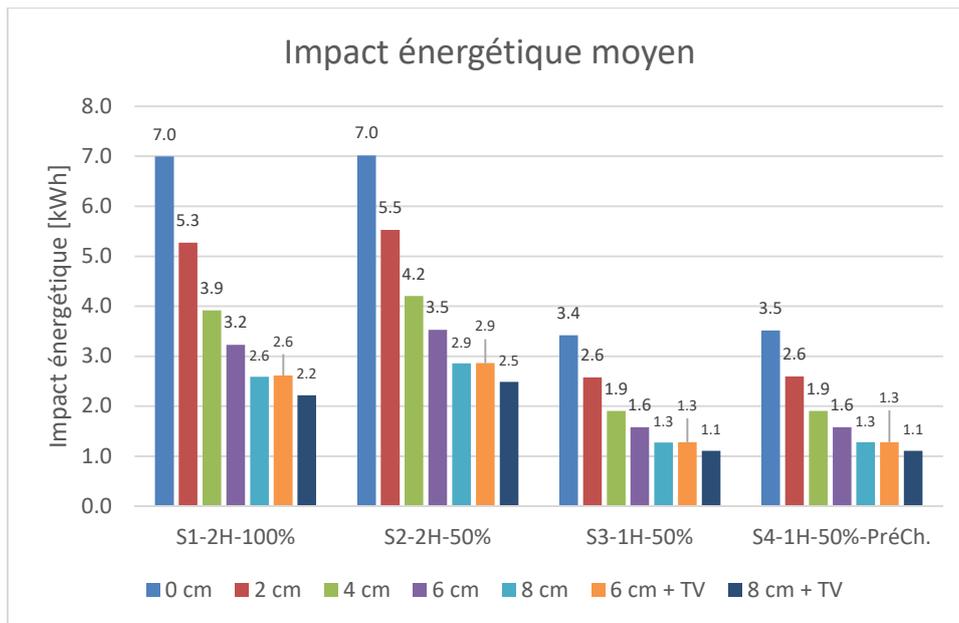


Figure 37 Impact énergétique moyen des différents scénarios et niveaux d'isolation pour la période étudiée [kWh].

En analysant le deuxième scénario, nous nous rendons compte d'une hausse de l'impact énergétique très légère par rapport au premier scénario pour les cas ayant une isolation. Elle se situe entre 200 et 300 Wh selon les cas. Ceci correspond à une quantité d'énergie qui se situe dans l'ordre de grandeur des gains internes perdus dans le cas de référence sans coupure du scénario 2. Le cas non-isolé quant à lui n'a pas de variation notable de son impact énergétique. La diminution de l'impact énergétique d'un niveau d'isolation à l'autre reste similaire à celle observée dans le premier scénario.

La coupure appliquée dans les scénarios 3 et 4 n'étant que d'une heure, il est normal d'avoir un impact énergétique moindre. Pour le scénario 3, les valeurs d'impact énergétique pour les différents cas d'isolation sont en moyenne à 46% (écart-type de 1%) des valeurs du scénario 2, ce qui reflète la diminution du temps de coupure de 50%, et tout en prenant compte que la deuxième heure de coupure du scénario 2 a une occupation moindre. Concernant le scénario 4, les impacts énergétiques n'ont pas de différence significative comparés à ceux du scénario 3.

Enfin, un dernier mot à propos de la variante d'infiltration sur le cas d'isolation de 6 cm avec double vitrage. Nous pouvons observer une différence de l'ordre de 30% entre les taux d'infiltration de 0.6 h^{-1} et 0.15 h^{-1} dans le premier scénario. Cette différence se tasse aux alentours des 15% pour les autres scénarios.

3.2.1.4 La surconsommation⁵

Les surconsommations moyennes des différents scénarios et de variantes d'isolation sont reprises dans la figure 38. Comme pour l'impact énergétique commençons par analyser le scénario 1. Nous pouvons retrouver 2 tendances que nous avons observées dans l'analyse de l'impact énergétique. Premièrement, la surconsommation est plus importante dans les cas les moins bien isolés. Le cas non-isolé monte à 5.3 kWh de surconsommation ; entre 2 et 6 cm d'isolation, nous passons de 4.3 kWh à 2.5 kWh (respectivement 81% et 47% du cas non-isolé) ; enfin les 3 derniers cas se trouvent entre 1.9 et 1.7 kWh (respectivement 35% et 32% du cas non-isolé). Notons que la chute de la surconsommation au travers des différents niveaux d'isolation est d'ampleur similaire à la chute de l'impact énergétique observé dans la section précédente. Deuxièmement, la diminution de la surconsommation d'un niveau d'isolation à l'autre est plus importante dans les isolations les moins épaisses; ceci est toujours en lien avec l'évolution des coefficients de transmission thermique des parois.

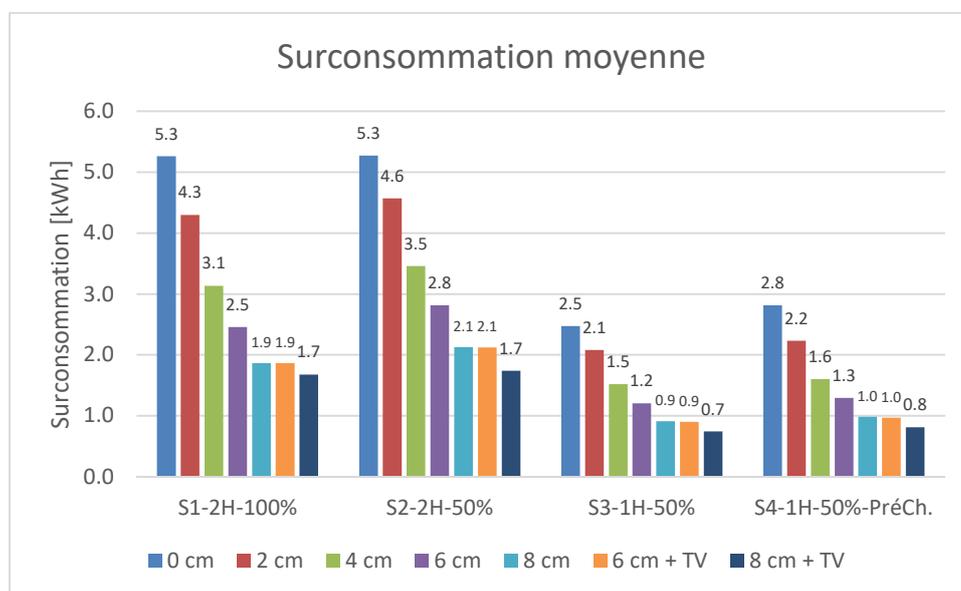


Figure 38 La surconsommation moyenne pour les différents scénarios et niveaux d'isolation pour la période étudiée [kWh].

Comparé aux valeurs du scénario 1, les surconsommations observées pour les différents niveaux d'isolation du scénario 2 sont globalement en légère hausse. Comme nous le montre le tableau 26, nous pouvons observer une hausse de surconsommation montant jusqu'à 13% dans les niveaux d'isolation intermédiaires. Il n'y a pas de hausse notable pour le cas non-isolé ni pour le meilleur cas d'isolation.

Hausse de la surconsommation entre les scénarios 1 et 2 [%]							
Niveau d'isolation	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	6 cm + TV	8 cm + TV
Hausse [%]	0%	7%	13%	12%	10%	10%	0%

Tableau 26 Hausse de la surconsommation entre les scénarios 1 et 2.

⁵ Pour rappel, la surconsommation qui est discuté dans cette section se fait par rapport à un système de chauffage avec un rendement de 100%, aucun COP n'est pris en compte dans les résultats.

Afin de comprendre la particularité de cette hausse surtout marquée pour les cas intermédiaires il faut analyser la relance qui suit la coupure et plus particulièrement les températures à laquelle elle débute. Le tableau 27 reprend les températures de l'air du salon en début de relance pour les scénarios 1 et 2 et ce pour trois des niveaux d'isolation, le jour le plus froid (le 15 janvier). Ces valeurs nous apprennent deux choses. Premièrement, la différence entre la température de début de la relance entre le scénario 1 et 2 est plus importante dans les cas les mieux isolés. Ceci montre que les gains internes ont proportionnellement plus d'influence sur ces derniers vu leur puissance de chauffe moindre. Deuxièmement, les températures atteintes sont les plus basses dans les cas les moins bien isolés, étant de fait moins performants énergétiquement. Ces températures plus basses provoquent une relance nécessitant des puissances de chauffe plus importantes et provoquant une surconsommation en hausse, notamment entre les 2 scénarios étudiés. C'est pour cette raison même que des surpuissances ont été calculées dans le dimensionnement de la puissance de chauffe pour assurer un temps de relance correcte. Paradoxalement, cette augmentation de surconsommation est pourtant moins marquée, voire absente, dans les variantes moins bien isolées ou sans isolation. Ces derniers cas étant à ce point peu performants, la température de l'air en début de relance est du même ordre de grandeur entre les 2 scénarios.

Température de l'air du living avant la relance des scénarios 1 et 2 le 15 janvier [°C]			
	0 cm	6 cm	8 cm +TV
Sc1	18	19.5	20.4
Sc2	18	18.6	19.3

Tableau 27 Température avant la relance des scénarios 1 et 2 le 15 janvier de 3 niveaux d'isolation.

Tout comme pour l'impact énergétique, nous observons une baisse attendue de la surconsommation dans les scénarios 3 et 4. Pour le scénario 3, nous avons en moyenne des valeurs de surconsommation valant 44% de celles du scénario 2 (écart-type de 2%), ce qui est cohérent vu que la coupure de chauffage est diminuée de moitié par rapport à ce dernier et que l'occupation est moindre dans sa deuxième heure de coupure. Comparé au scénario 3, le scénario 4 accuse une très légère hausse de surconsommation à cause de l'heure de préchauffe à 22°C précédant la coupure de chauffage. La quantité d'énergie dépensée durant l'heure de préchauffe étant directement liée à la performance du bâtiment, il est normal de voir une hausse plus importante de la surconsommation dans les cas les moins bien isolés. Le cas non-isolé présente en moyenne une hausse de surconsommation de près de 350 Wh contre 150 Wh pour le niveau d'isolation de 2 cm. Les autres cas enregistrent une surconsommation de l'ordre de 80 Wh. Nous sommes en moyenne à une hausse de la surconsommation de 8% par rapport au scénario 3. Enfin, toujours concernant le scénario 4, si nous nous concentrons uniquement sur l'heure de préchauffe à la température de 22°C, et comparons à un scénario de référence sans stratégie de coupure, nous observons des surconsommations entre de l'ordre de 300 Wh et 450 Wh excepté pour le cas non-isolé (1076 Wh) et le cas de 2 cm d'isolant (775 Wh) (voir tableau 28).

Surconsommation moyenne durant l'heure de préchauffe à la température de consigne de 22°C pour les différents niveaux d'isolation [Wh]						
0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	6 cm + TV	8 cm + TV
1076	775	453	435	316	299	298

Tableau 28 Surconsommations moyennes durant l'heure de préchauffe à la température de consigne à 22°C pour les différents niveaux d'isolation.

Au niveau des variantes d'infiltration sur le cas d'isolation de 6 cm avec double vitrage, nous observons une différence de l'ordre de 40% entre les taux d'infiltration de 0.6 h^{-1} et 0.15 h^{-1} pour le scénario 1 et de l'ordre de 16% pour les autres scénarios.

3.2.1.5 *Le taux de recouvrement*

L'analyse du taux de recouvrement nous montre que tous scénarios et niveaux d'isolation confondus, en moyenne, aucun taux de recouvrement ne dépasse les 100%. Pour le premier scénario, le taux de recouvrement se retrouve dans une fourchette comprise entre 71 et 82%. Cela signifie que la surconsommation provoquée par la coupure de chauffage est toujours inférieure à l'impact énergétique. À deux exceptions près, la figure 39 nous montre que les taux de recouvrement les plus bas sont obtenus avec les meilleurs niveaux d'isolation. De par leur meilleure performance énergétique, ces derniers arrivent à proportionnellement moins surconsommer. La première exception est illustrée par le bâtiment non-isolé qui obtient systématiquement un taux de recouvrement inférieur aux 3 premiers niveaux d'isolation. La deuxième exception est représentée par le meilleur niveau d'isolation dans le scénario 1, ayant un taux de recouvrement supérieur aux niveaux d'isolation qui le précèdent.

Pour que le recouvrement puisse diminuer d'un niveau d'isolation donné à un autre niveau plus performant, il faut que proportionnellement la surconsommation diminue en plus grande quantité que l'impact énergétique entre ces 2 cas, ce que l'on n'observe pas dans ces 2 exceptions. Si les performances énergétiques du bâtiment influent sur ces 2 indicateurs, nous avons également vu que la surconsommation est impactée par la température de l'air en début de relance du chauffage ainsi que par le surdimensionnement de la puissance de chauffe.

Le taux de recouvrement moindre observé dans le bâtiment non-isolé est causé par un impact énergétique fort important comparé aux premiers niveaux d'isolation (7 kWh), mais ayant des températures de l'air similaires à la fin de la coupure du chauffage que ces derniers. Ce qui est un obstacle à une surconsommation inférieure. L'explication est similaire pour notre deuxième exception à savoir que l'on a des températures d'air similaires avant la relance entre les 2 meilleurs niveaux d'isolation, mais que l'impact énergétique quant à lui diminue plus rapidement dû à la performance énergétique meilleure du niveau d'isolation de 8 cm + TV. Le recouvrement réagit donc à la fois à la performance du bâtiment et au comportement du bâtiment lors de la relance du chauffage. Ceci nous indique également que si, *a priori*, un taux de recouvrement moins important est signe d'une meilleure performance, il est toutefois nécessaire d'analyser en parallèle d'autres indicateurs énergétiques afin de pouvoir l'affirmer.

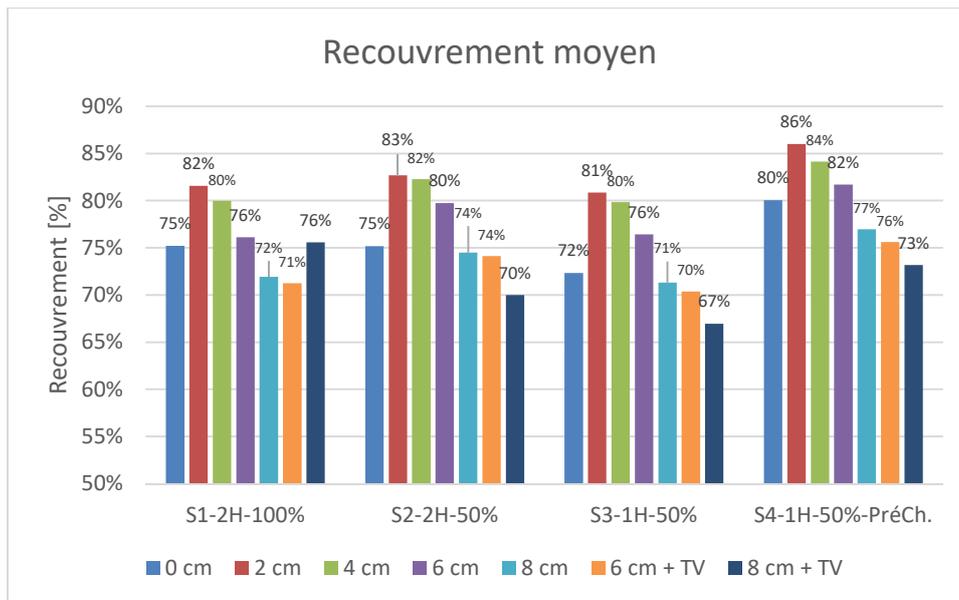


Figure 39 Recouvrement moyen pour les différents scénarios et niveaux d'isolation pour la période étudiée [%].

Mis à part pour le meilleur niveau d'isolation, nous remarquons une très légère hausse du recouvrement en partant du scénario 1 aux scénarios 2 et 4, respectivement de 4% et de 5% en moyenne. Une baisse du taux d'occupation et une période de préchauffe en sont la cause. *A contrario* nous observons une très légère baisse du recouvrement dans le scénario 3 (en moyenne de 2%) provoquée par une coupure de chauffage moins longue d'une heure. Le recouvrement reste donc globalement très stable dans les scénarios qui ont été envisagés.

Concernant les variantes de taux d'infiltration du cas d'isolation de 6 cm avec double vitrage, nous constatons des différences de l'ordre de 6% entre les taux d'infiltration de 0.6 h^{-1} et 0.15 h^{-1} dans le scénario 1, cette différence se situe entre 1 et 2% pour les autres scénarios.

3.2.2 Scénarios avec variantes de ventilation⁶

3.2.2.1 Le temps sans inconfort

Comme pour l'analyse du temps sans inconfort effectuée pour les variantes d'isolation (voir section 3.2.1.1), nous allons également procéder en plusieurs étapes. Nous allons dans un premier temps étudier l'évolution de la température opérative le jour le plus froid (le 15 janvier) et un jour à température moyenne (le 29 janvier) et cela pour le premier scénario de coupure (2 heures de coupure avec occupation complète). Dans un deuxième temps, nous allons comparer ce temps de coupure sans inconfort entre les différents scénarios de coupure pour les deux variantes de ventilation (avec et sans récupération de chaleur). Nous terminerons par quelques indicateurs statistiques de ces temps sans inconfort pour la période étudiée.

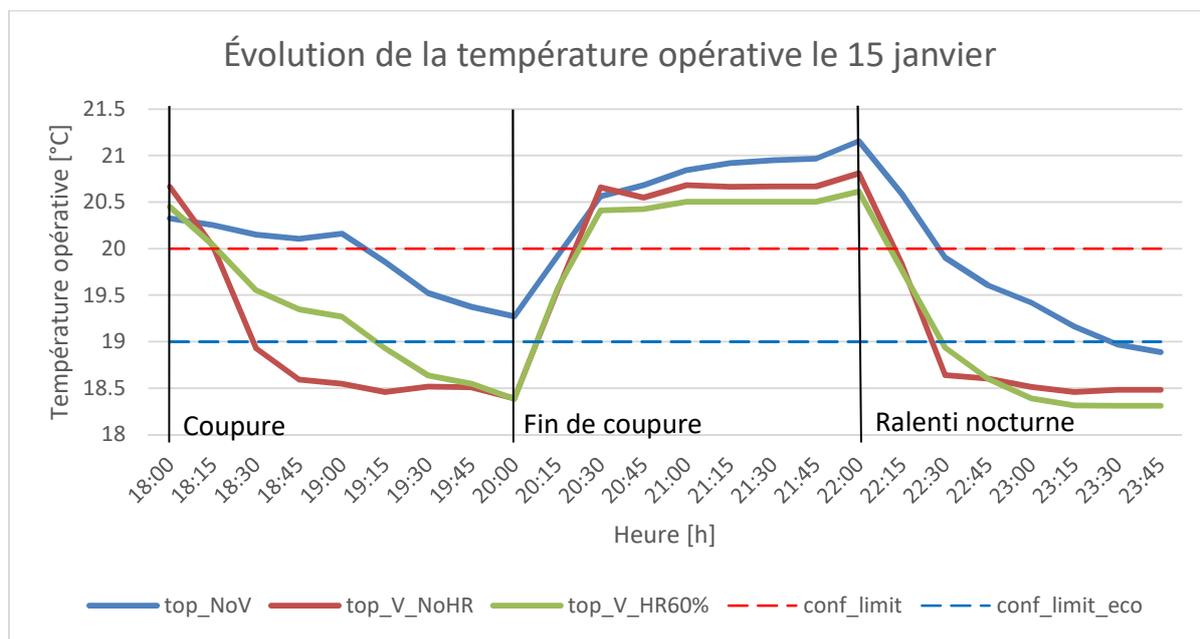


Figure 40 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier. Comparaison des différents types de ventilation.

Pour le jour le plus froid, nous pouvons constater que le temps sans inconfort pour le premier scénario de coupure est bien plus court pour les variantes avec ventilation. La figure 40 nous montre que les 2 cas ventilés descendent en-dessous de la limite de confort de 20°C à peine un quart d'heure après la coupure, là où le cas non-ventilé tient 1h15. La limite de confort de 19°C est quant à elle atteinte en 30 min pour le cas de ventilation sans récupération de chaleur contre 1h15 pour le cas de ventilation avec récupération de chaleur. *A contrario*, le bâtiment non-ventilé ne descend pas en dessous de cette limite de confort « économique » pour le scénario envisagé. La température opérative de 18.5°C est atteinte en fin de coupure pour le cas de ventilation avec récupération de chaleur et le chauffage ne s'est pas remis en marche dans le salon à la température de consigne de 18°C. Le cas sans récupération de chaleur atteint une température opérative proche des 18.5°C après seulement 45 min et la demande de chauffage en température de consigne de 18°C dans le salon a été continuée lors de la

⁶ Afin de simplifier la présentation et la lecture des résultats, les différents scénarios et variantes sont identifiés par un libellé explicite dont la signification se retrouve dans le tableau 12 à la page 34 et dans le tableau 18 à la page 38.

coupure. La vitesse de chute de température opérative moyenne dans les cas ventilés sans et avec récupération de chaleur sont respectivement de l'ordre de 5 fois et 2 fois plus importante que le cas non ventilé (voir tableau 29).

Vitesse de chute de température opérative moyenne observée [°C/h]		
top NoV	top V_NoHR	top V_HR60%
0.53	2.77 (*)	1.03

Tableau 29 Chutes de température moyennes durant la coupure pour les différents cas de ventilation le 15 janvier. (*) Moyenne calculée sur 45 min pour le cas ventilé sans récupération de chaleur, qui correspond au temps pour atteindre la température minimale.

Pour un jour moyen (le 29 janvier), nous observons que le temps de coupure sans inconfort s'allonge par rapport au cas précédent (voir figure 41). Comme déjà évoqué dans la section 3.2.1.1, le cas non-ventilé ne descend plus en-dessous de la limite de confort des 20°C durant la coupure. Le cas ventilé avec récupération de chaleur débute la période de coupure à une température opérative de 20.5°C pour terminer à 19.4°C en fin de coupure. Il lui faut une heure pour passer en-dessous de la limite de confort des 20°C. Le cas ventilé sans récupération de chaleur quant à lui se situe également à la température opérative de 20.5°C en début de coupure mais terminera à 18.5°C à la fin de cette dernière. Ce dernier cas franchit les 2 limites de confort de 20°C et 19°C respectivement après 30 min et 1h. Comparé au jour le plus froid, nous nous apercevons que les vitesses de chute de température présentées dans le tableau sont réduites de l'ordre de la moitié.

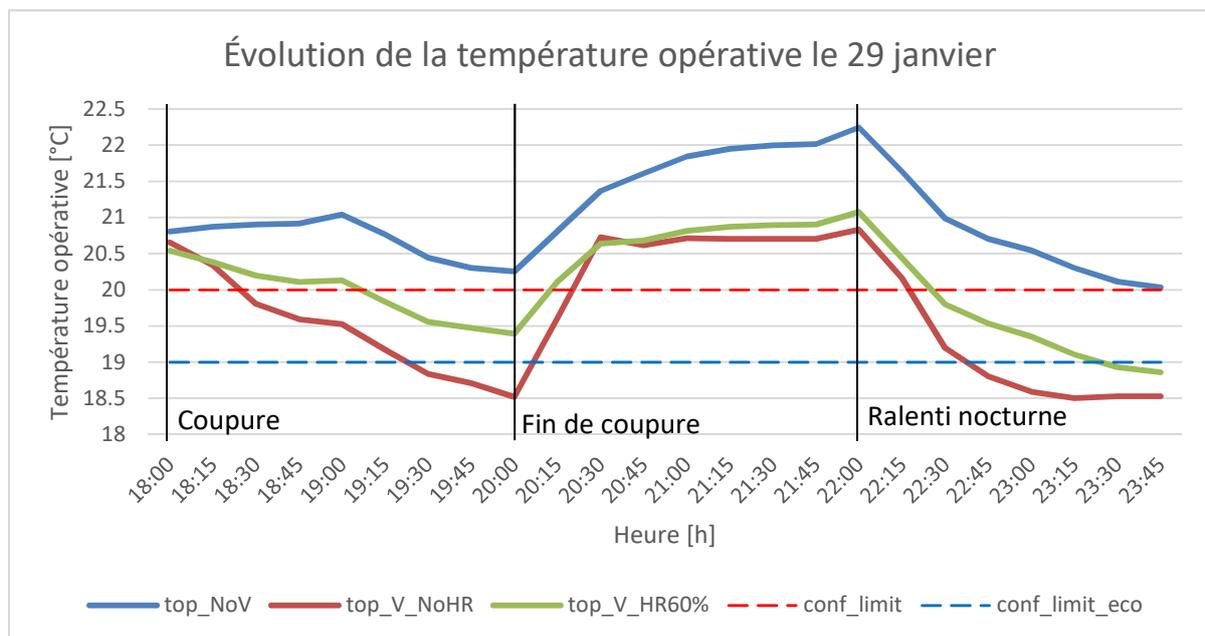


Figure 41 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure un jour moyen : le 29 janvier. Comparaison des différents types de ventilation.

Vitesse de chute de température opérative moyenne observée [°C/h]		
top NoV	top V_NoHR	top V_HR60%
0.28	1.07	0.57

Tableau 30 Chutes de température moyennes durant la coupure pour les différents cas de ventilation le 29 janvier.

Les figures 42 et 43 nous montrent l'influence que peuvent avoir les 4 scénarios de coupure sur l'évolution de la température opérative respectivement pour les variantes de ventilation sans et avec récupération de chaleur et ce pour le jour le plus froid (le 15 janvier). Nous remarquons rapidement que les différents scénarios n'ont que très peu d'influence sur le cas ventilé sans récupération de chaleur. Les deux scénarios avec une coupure de deux heures (S1 et S2) ont une évolution quasi identique durant la coupure. Nous notons toutefois une légère différence de température opérative après que la reprise ait eu lieu (0.2°C) attestant des gains internes liés à l'occupation plus importants dans le scénario 1. Il en va de même pour les deux scénarios avec une coupure d'une heure (S3 et S4) à l'exception près que le scénario 4 débute la coupure à une température plus élevée de 0.8°C. Si cette température plus élevée due à la préchauffe à 22°C permet de rester un quart d'heure de plus au-dessus de la limite de confort à 20°C par rapport au scénario 3, l'évolution de la température opérative reste cependant similaire par la suite. Les importantes déperditions par ventilation dans cette variante causent une vitesse de chute de température telle que l'impact lié aux gains internes ou à une préchauffe sont négligeables le jour le plus froid.

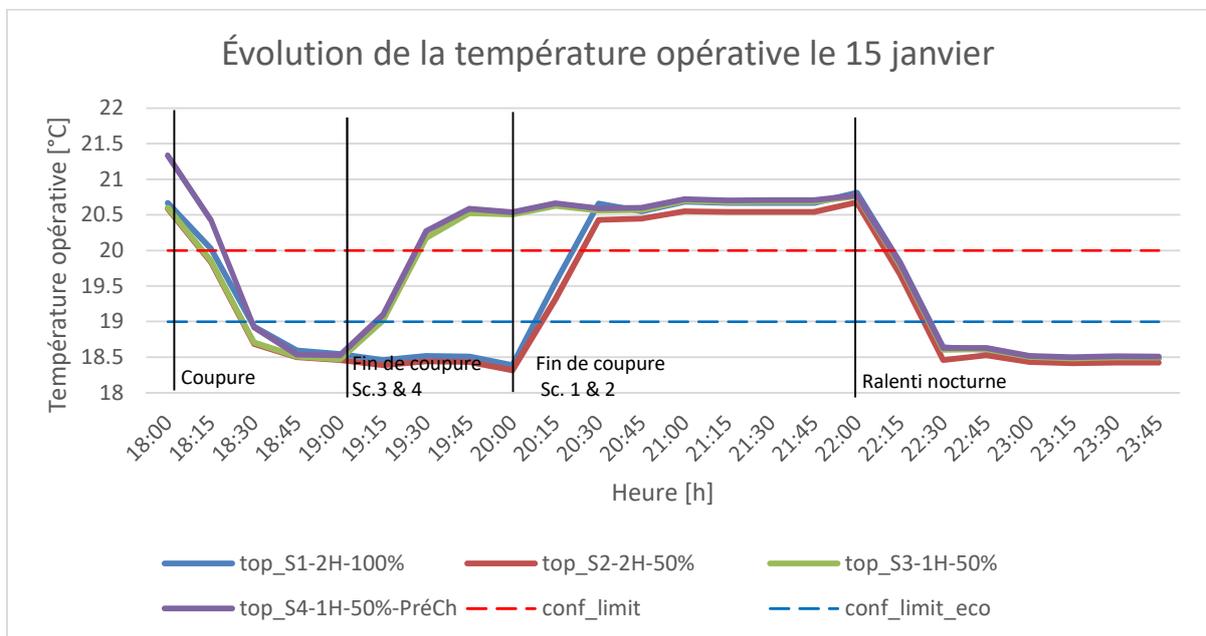


Figure 42 Évolution de la température opérative des 4 scénarios de coupure pour le cas ventilé sans récupération de chaleur. Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier

L'évolution de la température opérative de notre variante de ventilation avec récupération de chaleur pour les différents scénarios de coupure est plus nuancée que pour le cas précédent (voir figure 43). Si l'ensemble des scénarios atteignent la limite de confort de 20°C entre 15 et 30 min, les scénarios 1 et 4 atteignent la limite de confort de 19°C plus tardivement que les autres : 1h15 pour le scénario 1, 1 h pour le scénario 4 contre 45 min pour les deux autres. Le scénario 4 est le seul à pouvoir tenir la limite de confort de 19°C le jour le plus froid. Les scénarios 2 et 3 tiennent 45 min au-dessus de cette limite, soit 15 min de plus qu'avec la ventilation sans récupération. Limiter les déperditions avec la récupération de chaleur permet donc de retarder et de mettre mieux à profit les gains internes ou la préchauffe.

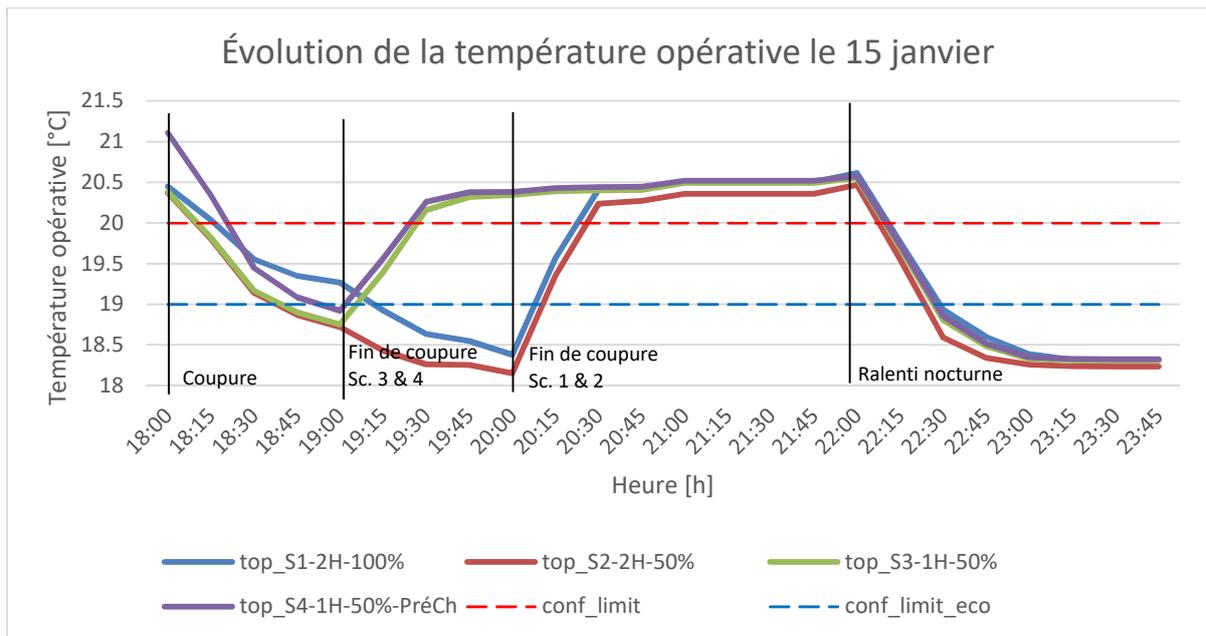


Figure 43 Évolution de la température opérative des 4 scénarios de coupure pour le cas ventilé avec récupération de chaleur. Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier

Enfin, comparons les indicateurs statistiques sur le temps de coupure sans inconfort présentés dans le tableau 31. Comparons tout d'abord les chiffres des 2 cas de ventilation à la limite de confort de 19°C. Nous voyons pour le cas avec récupération de chaleur que les temps moyens de coupure à la limite de confort de 19°C sont fort proches voire équivalents au temps d'arrêt du chauffage et cela pour les 4 scénarios différents. De plus, il y a peu de dispersion relevée sur ces temps moyens. Les résultats sont plus mitigés pour la variante sans récupération de chaleur. Si en moyenne elle arrive à tenir des temps fort proches du temps de coupure des scénarios 3 et 4 (1h de coupure), il n'en va pas de même pour les scénarios 1 et 2. Pour ces deux derniers scénarios avec une coupure de 2 heures nous sommes respectivement en moyenne à 1.5 h et 1.2 h de temps sans inconfort avec une dispersion plus importante de 0.5 h. Concernant les résultats à la limite de confort à 20°C, les chiffres des 2 variantes de ventilation se resserrent et révèlent en général une moins bonne performance. Par rapport au cas non-ventilé, nous observons une baisse du temps sans inconfort pour les cas de ventilation avec et sans récupération de respectivement de l'ordre de 40 et 60% dans les 2 premiers scénarios, et de l'ordre de 25 et 40% dans les 2 derniers. Nous pouvons également remarquer que la variante sans récupération de chaleur n'arrive jamais à tenir 2 heures de coupure sans inconfort à la limite de 20°C. De façon générale, la limite de confort à 20°C est difficile à tenir pour les 2 cas de ventilation.

Temps sans inconfort lors de la coupure									
Scénarios		Confort 19°C				Confort 20°C			
		Temps [h]				Temps [h]			
Scénario	Ventilation	Moy	ÉT	Min	Max	Moy	ÉT	Min	Max
S1-2H-100%	NoV	2.0	0.0	2.0	2.0	1.8	0.3	1.3	2.0
S1-2H-100%	V_NoHR	1.5	0.5	0.5	2.0	0.7	0.4	0.5	1.8
S1-2H-100%	V_HR60%	1.9	0.2	1.3	2.0	1.2	0.6	0.5	2.0
S2-2H-50%	NoV	1.9	0.2	1.5	2.0	1.2	0.7	0.3	2.0
S2-2H-50%	V_NoHR	1.2	0.5	0.5	2.0	0.5	0.2	0.3	1.3
S2-2H-50%	V_HR60%	1.7	0.4	0.8	2.0	0.7	0.6	0.3	2.0
S3-1H-50%	NoV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.8	0.3	0.3	1.0
S3-1H-50%	V_NoHR	0.9	0.2	0.5	1.0	0.5	0.2	0.3	1.0
S3-1H-50%	V_HR60%	1.0	0.1	0.8	1.0	0.6	0.3	0.3	1.0
S4-1H-50%-PréCh.	NoV	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0
S4-1H-50%-PréCh.	V_NoHR	0.9	0.2	0.5	1.0	0.6	0.2	0.5	1.0
S4-1H-50%-PréCh.	V_HR60%	1.0	0.0	1.0	1.0	0.7	0.2	0.5	1.0

Tableau 31 Valeurs moyennes (et écarts-types), minimales et maximales des temps sans inconfort lors de la coupure pour les variantes de ventilation. Chiffres pour une température limite de confort à 19°C et à 20°C.

3.2.2.2 Les degrés-heures d'inconfort

Les résultats concernant les degrés-heures d'inconfort présentés dans la figure 44 nous montrent une nette hausse des degrés-heures d'inconfort pour le premier scénario (scénario avec l'ensemble des gains). La variante avec ventilation sans récupération monte à 409 degrés-heures contre 382 pour la variante avec ventilation et avec récupération de chaleur, soit une hausse respectivement +57% et +47% par rapport au cas non ventilé.

Si la baisse du taux d'occupation dans le scénario 2 a un impact sur l'augmentation du nombre de degrés-heures des cas ventilés (+6 et +12% respectivement pour les cas de ventilation sans et avec récupération de chaleur), cet impact est d'autant plus important pour le cas non-ventilé (+45%). Ceci a pour effet de tasser les écarts entre cas non-ventilés et ventilés (en moyenne +14%). En outre les écarts entre les deux cas ventilés deviennent négligeables.

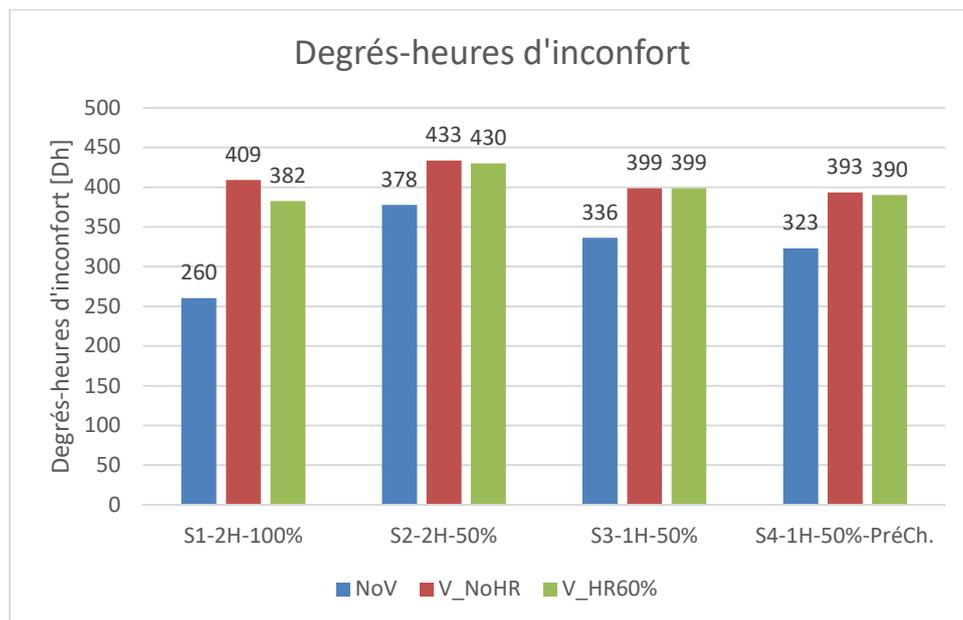


Figure 44 Degrés-heures d'inconfort observés dans les différents scénarios de coupure et type de ventilation.

Comparés à ceux du scénario 2, les résultats du scénario 3 nous montrent une baisse du nombre de degrés-heure d'une valeur proche de 30 pour les 2 cas ventilés, ce qui est légèrement moins performant que pour la variante sans ventilation (baisse de 42 Dh). Nous observons le même comportement dans le scénario 4 où la préchauffe à la température de consigne de 22°C a un impact légèrement plus important d'une dizaine de degrés-heures sur le cas non-ventilé.

3.2.2.3 L'impact énergétique⁷

Tout comme nous l'avons fait pour les variantes d'isolation, nous présentons avant toute chose les chiffres de consommation du bâtiment en fonction de type de ventilation mis en place. Nous retrouvons les besoins annuels (sans et avec gains) et les besoins quotidiens moyens de la période étudiée dans le tableau 32.

Besoins du bâtiment en fonction du type de ventilation			
	NoV	V_NoHR	V_HR60%
Annuels [MWh]	7.4	12.8	9.5
Annuels (avec gains internes) [MWh]	3.7	8.8	5.6
Quotidiens moyens sur période étudiée [kWh]	21.2	42.7	29.7

Tableau 32 Besoins du bâtiment en fonction de son niveau type de ventilation. Consommation annuelle, consommation annuelle tenant compte des gains internes et consommation quotidienne moyenne durant la période étudiée.

La mise en place de la ventilation dans les modèles a de façon très attendue augmenté la consommation quotidienne moyenne sur la période étudiée. Pour le premier scénario (2 heures de coupure, occupation complète), la consommation se situe en moyenne vers les 21 kWh/j pour le cas de référence sans ventilation. Cela augmente à de plus de 100% (43 kWh/j) pour le cas de ventilation sans récupération et à près de 70% (30 kWh/j) pour le cas de ventilation avec récupération. De façon logique, l'impact énergétique suit une tendance similaire, néanmoins avec des proportions moindres. Si l'impact énergétique du cas non-ventilé est de l'ordre de 3.2 kWh, celui du cas du de ventilation sans récupération se situe à 4.9 kWh (+53% par rapport au cas non-ventilé) et le dernier cas de ventilation avec récupération à 4.1 kWh (+28% par rapport au cas non-ventilé) (voir figure 45). L'énergie qui n'est pas dépensée durant la coupure représente 11 et 14% de la consommation quotidienne moyenne respectivement pour les cas ventilés sans et avec récupération de chaleur, contre 15% pour le cas non-ventilé.

⁷ Pour rappel, l'impact énergétique qui est discuté dans cette section se fait par rapport à un système de chauffage avec un rendement de 100%, aucun COP n'est pris en compte dans les résultats.

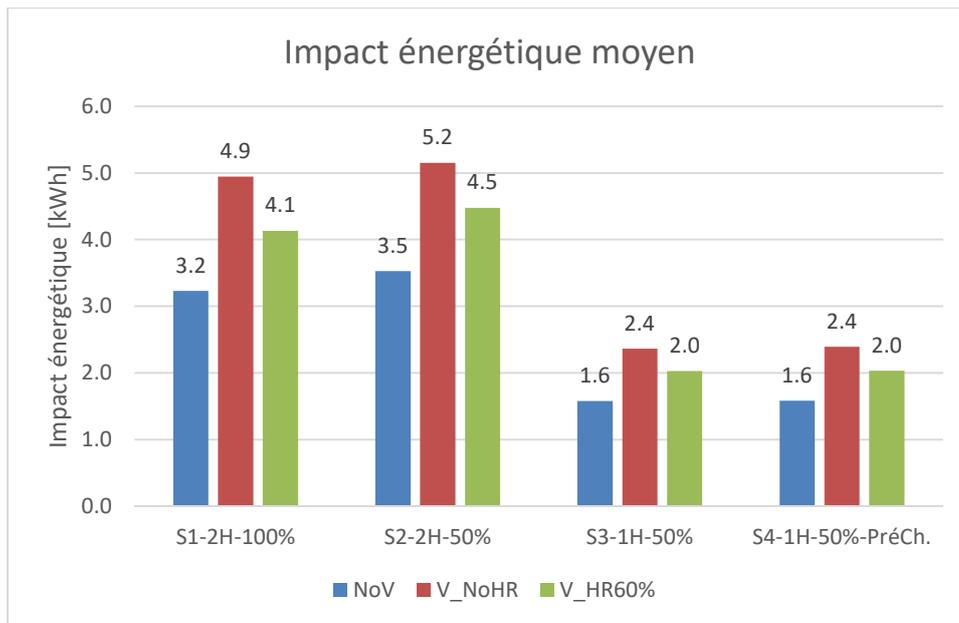


Figure 45 Impact énergétique moyen des différents scénarios et variantes de ventilation.

Tout comme pour les variantes d'isolation, nous observons une légère hausse de l'impact énergétique dans le deuxième scénario de l'ordre de 300 Wh. Cette hausse correspond à la perte des gains internes suite à une occupation moindre dans ce scénario. Les valeurs observées pour scénario 3 et 4 ont des impacts similaires et se situent en moyenne à 45% des valeurs obtenues dans le scénario 2. Ceci qui est cohérent par rapport à la diminution de la moitié du temps de coupure.

Scénarios 2, 3 et 4 confondus, l'augmentation moyenne de l'impact énergétique dans les cas de ventilation sans et avec récupération de chaleur par rapport au cas non-ventilé est respectivement de 50% et de 28%

3.2.2.4 La surconsommation⁸

Comme nous le montre la figure 46, l'évolution de la surconsommation au travers des variantes de ventilation suit les mêmes tendances mais en proportions différentes. Si le cas de référence surconsomme à hauteur de 2.5 kWh, cela monte à 3.9 kWh (soit + 56%) pour le cas de ventilation sans récupération et à 3.3 kWh (soit + 32%) pour le cas de ventilation avec récupération de chaleur. Le cas ventilé sans récupération de chaleur accuse donc la surconsommation la plus importante. Nous remarquons que l'écart entre les surconsommations des 2 cas ventilés est plus réduit que l'écart entre l'impact énergétique de ces derniers. Dans les deux cas, la ventilation fait en sorte que la température de l'air en fin de coupure soit identique et provoque une relance ayant des besoins similaires. De ce fait, la surconsommation causée par la relance est proportionnelle aux chiffres de l'impact énergétique plus importants pour le cas de ventilation avec récupération.

Si nous analysons l'évolution de la surconsommation entre les deux premiers scénarios, nous observons une hausse de la surconsommation plus légère pour le cas de la ventilation sans

⁸ Pour rappel, la surconsommation qui est discuté dans cette section se fait par rapport à un système de chauffage avec un rendement de 100%, aucun COP n'est pris en compte dans les résultats.

récupération (+ 5%) que les deux autres cas (+12% en moyenne). De la même manière que pour les variantes d'isolation, la baisse des gains internes a plus d'influence sur les cas les plus performants.

Comparés au scénario 2, nous pouvons constater une baisse de la surconsommation dans le scénario 3 en moyenne de 56% liée au temps de coups réduit de moitié. Entre le scénario 3 et le scénario 4, nous observons une hausse de la surconsommation de l'ordre de 11% (+ 170 Wh) pour le cas de ventilation sans récupération de chaleur contre de l'ordre de 7% pour le cas de référence et le cas ventilé avec récupérations de chaleur (respectivement + 80 Wh et + 120 Wh).

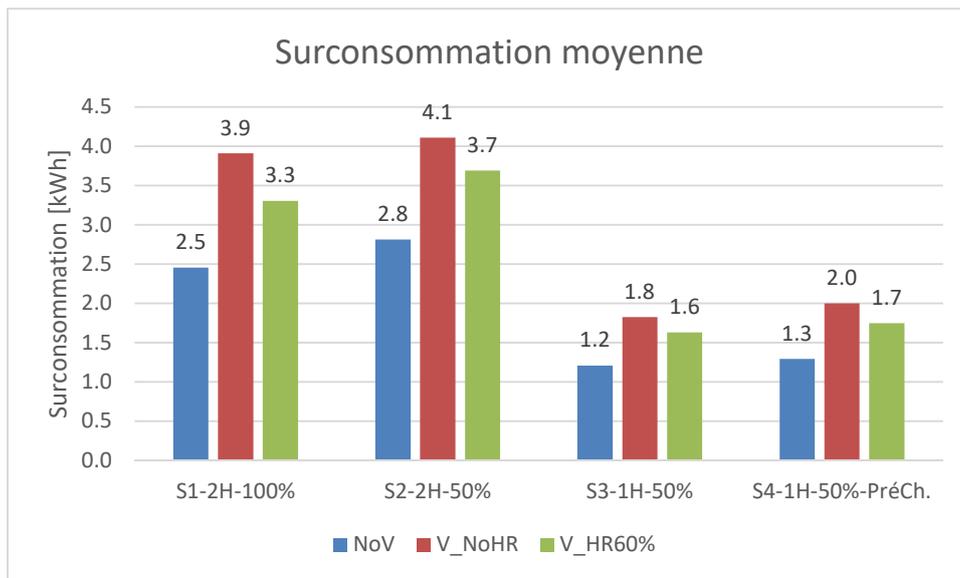


Figure 46 Surconsommation moyenne des différents scénarios et des types de ventilation.

Si nous isolons la surconsommation de l'heure de préchauffe à 22°C du scénario 4, nous voyons que celle-ci est près du double dans les cas ventilés par rapport au cas non-ventilé et est de l'ordre de 800 Wh.

Surconsommation moyenne durant l'heure de préchauffe à la température de consigne de 22°C pour les différents types de ventilation [Wh]			
	NoV	V_NoHR	V_HR60%
	435	832	788

Tableau 33 Surconsommation moyenne durant l'heure de préchauffe à la température de consigne de 22°C pour les différents types de ventilation.

3.2.2.5 Le taux de recouvrement

De façon attendue, l'analyse du recouvrement nous met en évidence que les variantes ventilées ont un taux de recouvrement supérieur (voir figure 47). Nous restons toutefois dans une gamme de recouvrements similaire à ce qui a été observé dans les variantes d'isolation (entre 76 et 86%). Le taux de recouvrement le plus important est observé dans le cas de ventilation avec récupération, même si *a priori* nous aurions pu penser que ce soit le cas sans récupération de chaleur. La raison a déjà été évoquée dans la section précédente en analysant la surconsommation. Effectivement, cette dernière est proportionnellement plus élevée par rapport à l'impact énergétique dans ce cas, ce qui est dû à une température de l'air similaire en début de relance dans les 2 cas de ventilation.

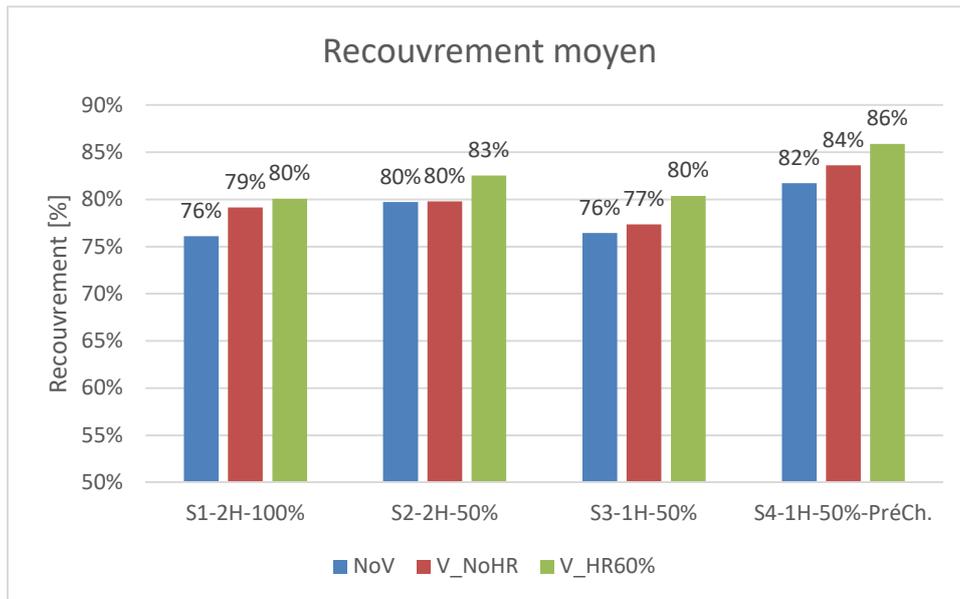


Figure 47 Recouvrement moyen des différents scénarios et des types de ventilation.

3.2.3 Scénarios avec variantes d'inertie thermique⁹

L'analyse de la dernière variante des scénarios, se portant sur l'inertie thermique du bâtiment, nous apprend qu'il n'y a pas de différences significatives entre le scénario de référence et les deux variantes analysées pour l'ensemble des indicateurs étudiés. Les résultats seront présentés dans les 4 sous-sections suivantes mais ne seront que brièvement commentés comme le cas de référence aura déjà été analysé plus en profondeur dans la section 3.2.1.

3.2.3.1 Le temps sans inconfort

Nous pouvons constater qu'il n'y a aucune différence significative au sujet du temps sans inconfort que ce soit dans la figure 48, illustrant l'évolution de la température opérative durant la coupure le jour le plus froid, ou que ce soit dans le tableau 34, reprenant les différents indicateurs statistiques à propos du temps sans inconfort durant la coupure. La prise en compte d'une chape de ciment de 5 ou 8 cm dans notre modèle n'a pas eu d'effet notable sur cet indicateur et cela pour les 4 scénarios étudiés.

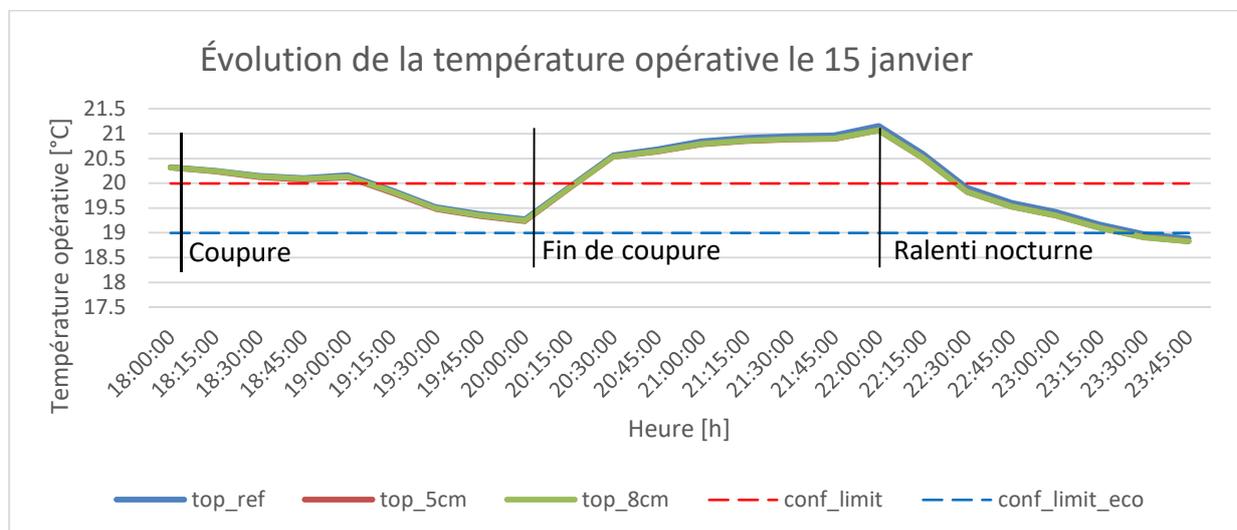


Figure 48 Évolution de la température opérative après une stratégie de coupure de 2 heures et gains internes complets (Scénario de base 1). Coupure le jour le plus froid : le 15 janvier. Comparaison d'un cas de référence sans chape au plancher de l'étage (isolation 6 cm et double vitrage) avec deux cas d'épaisseurs de chapes différentes (5 et 8 cm).

⁹ Afin de simplifier la présentation et la lecture des résultats, chaque série de test est identifiée par un libellé explicite dont la signification se retrouve dans le tableau 12, page 34

Temps sans inconfort lors de la coupure									
		Confort 19°C				Confort 20°C			
Scénarios		Temps [h]				Temps [h]			
Scén.	Chape [cm]	Moy	ÉT	Min	Max	Moy	ÉT	Min	Max
S1-2H-100%		2.0	0.0	2.0	2.0	1.8	0.3	1.3	2.0
S1-2H-100%	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	1.8	0.3	1.3	2.0
S1-2H-100%	4.0	2.0	0.0	2.0	2.0	1.8	0.3	1.3	2.0
S2-2H-50%		1.9	0.2	1.5	2.0	1.2	0.7	0.3	2.0
S2-2H-50%	2.0	1.9	0.2	1.5	2.0	1.0	0.7	0.3	2.0
S2-2H-50%	4.0	1.9	0.2	1.5	2.0	1.0	0.7	0.3	2.0
S3-1H-50%		1.0	0.0	1.0	1.0	0.8	0.3	0.3	1.0
S3-1H-50%	2.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.8	0.3	0.3	1.0
S3-1H-50%	4.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.8	0.3	0.3	1.0
S4-1H-50%-PréCh.		1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0
S4-1H-50%-PréCh.	2.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0
S4-1H-50%-PréCh.	4.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	1.0

Tableau 34 Valeurs moyennes (et écarts-types), minimales et maximales des temps sans inconfort lors de la coupure pour les différents scénarios et masses thermiques du bâtiment. Chiffres pour une température limite de confort à 19°C et à 20°C.

3.2.3.2 Les degrés-heures

La mise en œuvre de deux épaisseurs de chape différente ne fait varier le nombre total de degrés-heures qu'entre 0.5% et 2% par rapport au cas de référence en fonction du scénario (voir figure 49). Elle résulte de l'intégration de différences non-significatives de degrés-heures que l'on peut observer entre les différents cas au cours des 15 jours étudiés.

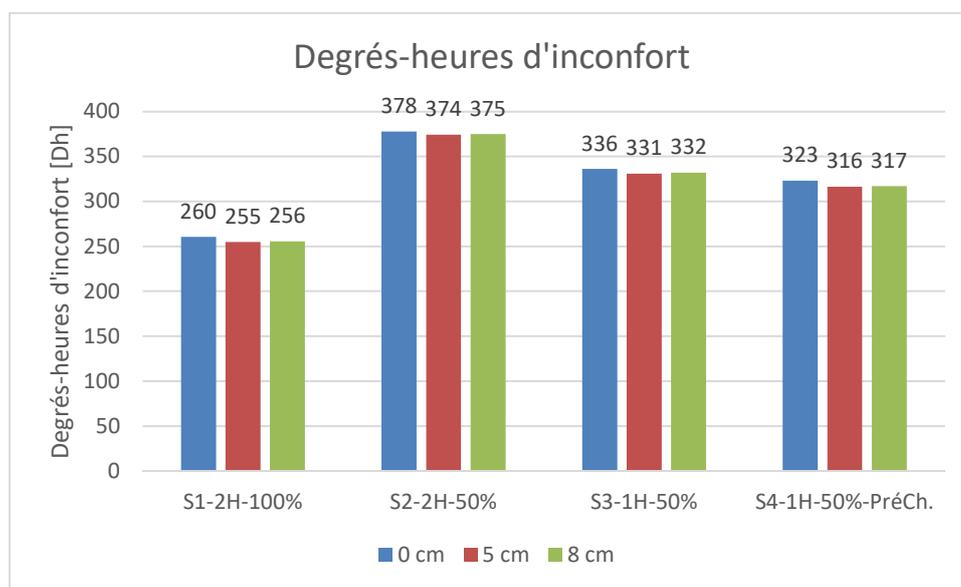


Figure 49 Degrés-heures d'inconfort observés dans les différents scénarios de coupure et de masse thermique du bâtiment.

3.2.3.3 L'impact énergétique¹⁰

La figure 50 nous montre que par rapport au cas de référence, la variation de l'impact énergétique moyen au travers des différents scénarios se limite à une augmentation entre de l'ordre de 1.5% et 2% pour les 2 cas ayant mis en place une chape, ce qui signifierait que la consommation est plus importante dans les modèles équipés d'une chape. Néanmoins, cette très légère hausse de l'impact

¹⁰ Pour rappel, l'impact énergétique qui est discuté dans cette section se fait par rapport à un système de chauffage avec un rendement de 100%, aucun COP n'est pris en compte dans les résultats.

énergétique de quelques dizaines de Wh est tout même à prendre avec précaution. En effet, si nous constatons une hausse de l'impact énergétique dans les deux variantes avec une chape, ces derniers ont paradoxalement une consommation quotidienne totale moyenne en baisse par rapport au cas de référence (voir tableau 35). En comparant de plus près les consommations du modèle de référence à celles des modèles avec une masse thermique plus importante tout le long d'une journée, nous remarquons que la hausse de consommation ne se produit qu'à certains moments de la journée. En outre, le moment où se produit cette hausse de consommation, ainsi que la durée de cette dernière, semble dépendre de l'historique météorologique des jours précédents. Lors de la relance de chauffage de l'après-midi, la hausse de consommation par rapport au cas de référence se produit plus tôt dans la journée et sur une période plus longue les jours ayant une historique météorologique plus rude les jours précédents. Une analyse succincte de la température de surface de la chape montre qu'elle diminue également plus rapidement ces jours-là. L'hypothèse d'explication de ce phénomène serait que la hausse temporaire de la consommation soit liée à une masse thermique plus importante (donc plus de stockage), dont l'ampleur dépend de la contribution de cette masse au confort thermique du bâtiment (plus de contribution les jours froids). Il serait intéressant d'étudier en détail le comportement des parois afin de vérifier cette hypothèse, mais cette analyse ne fait pas parti de ce présent mémoire. Au-delà de cette explication, cela veut surtout dire que si la coupure avait été paramétrée à un autre moment de la journée dans le modèle, nous aurions tout aussi bien pu observer une diminution de l'impact énergétique par rapport au cas de référence.

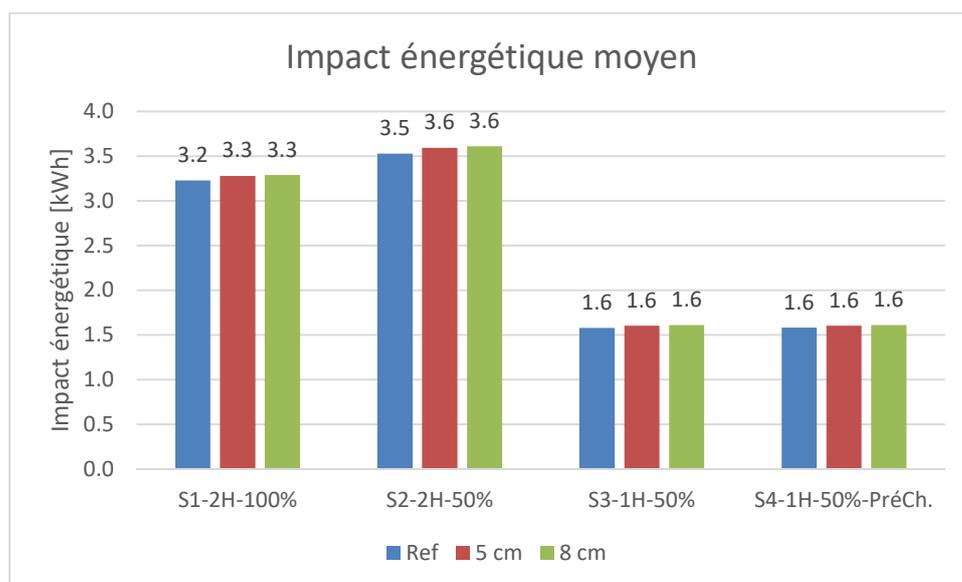


Figure 50 Impact énergétique moyen des différents scénarios et masses thermiques du bâtiment.

Besoins du bâtiment en fonction de la masse thermique			
	Réf	5 cm	8 cm
Annuels [MWh]	7.4	7.3	7.2
Annuels (avec gains internes) [MWh]	3.7	3.7	3.7
Quotidiens moyens sur période étudiée [kWh]	21.2	21.0	20.9

Tableau 35 Besoins du bâtiment en fonction de sa masse thermique. Consommation annuelle, consommation annuelle tenant compte des gains internes et consommation quotidienne moyenne durant la période étudiée.

3.2.3.4 La surconsommation¹¹

Tout comme pour l'impact énergétique, l'augmentation de la surconsommation dans les modèles dont la masse thermique a été modifiée, reste très modérée (+- 1%). En outre, les valeurs récoltées pour cet indicateur sont à prendre avec les mêmes précautions que pour l'impact énergétique (voir section précédente).

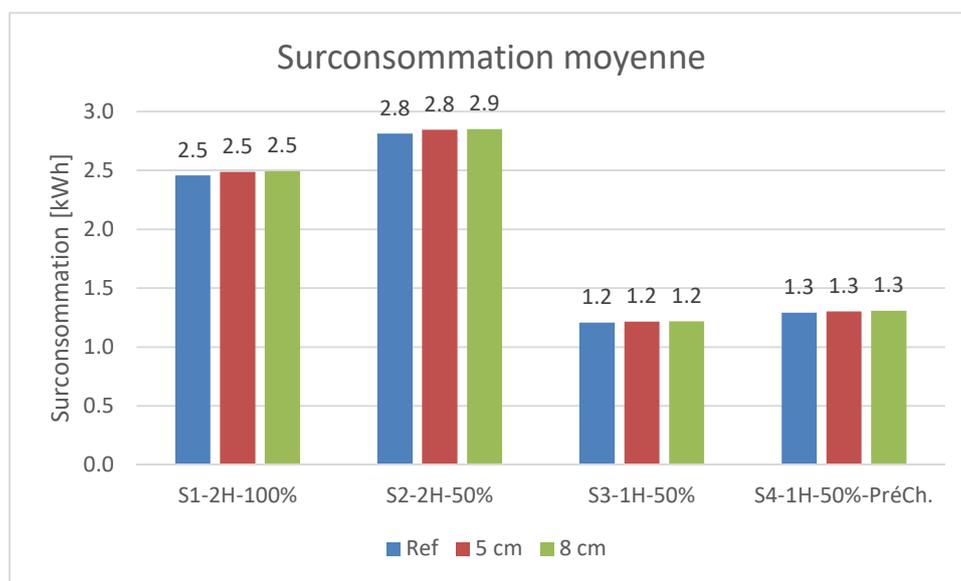


Figure 51 Surconsommation moyenne des différents scénarios et masses thermiques du bâtiment.

¹¹ Pour rappel, la surconsommation qui est discuté dans cette section se fait par rapport à un système de chauffage avec un rendement de 100%, aucun COP n'est pris en compte dans les résultats.

3.2.3.5 Le recouvrement

Sans grande surprise, vu les variations peu significatives observées dans l'impact énergétique et dans la surconsommation, les taux de recouvrement moyens des 2 modèles avec une masse thermique supérieure sont similaires à celui du cas de référence, avec au maximum 1% de différence (voir figure 52).

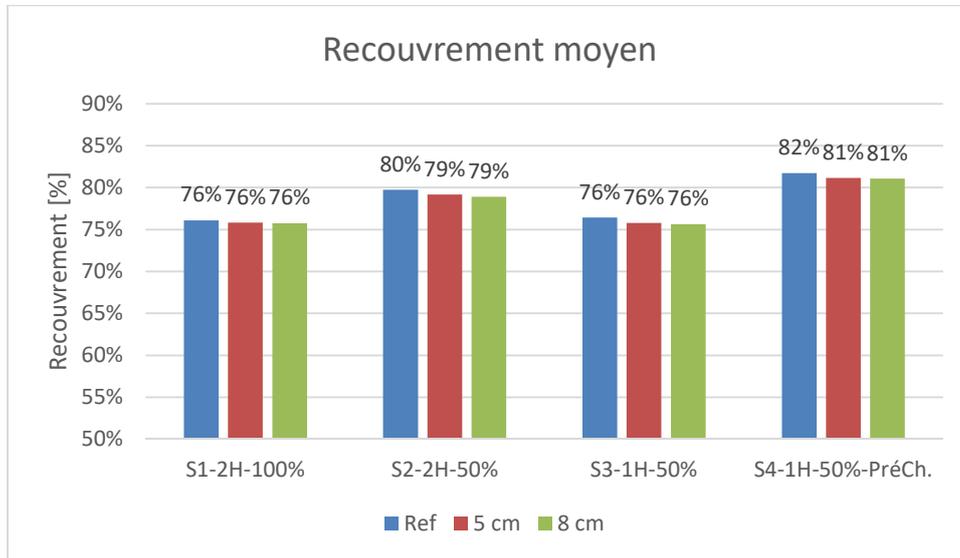


Figure 52 Recouvrement moyen des différents scénarios et masses thermiques du bâtiment.

3.2.4 Combinaisons des indicateurs de confort thermique et de performance

Pour terminer l'analyse des résultats et afin d'avoir une vue synthétique des différents scénarios et variantes, nous allons présenter les résultats en combinant les résultats des degrés-heures d'inconfort et des taux recouvrement. Pour plus de lisibilité, nous allons présenter une combinaison de résultats par le biais de deux graphiques. Le premier graphique (voir figure 53) combine les taux de recouvrement et les degrés-heures d'inconfort de l'ensemble des variantes d'isolation, de ventilation et d'inertie thermique dans le cadre du premier scénario de coupure (2 heures de coupure avec la totalité des gains internes). Le deuxième graphique (voir figure 54) quant à lui combine ces mêmes indicateurs mais pour l'ensemble des 4 scénarios de coupure. Dans ce dernier cas nous nous limitons à présenter les résultats des variantes d'isolation au seul cas de 6 cm d'isolant avec double vitrage et ceux des variantes de masse thermique avec une chape de 8 cm.

Nous considérons l'indicateur du taux de recouvrement comme étant bon en-dessous de 50% et mauvais au-delà des 100%. Nous considérons l'indicateur des degrés-heures d'inconfort comme étant très bon pour une situation où l'on a maximum 10% du temps en inconfort avec une différence maximale de 2°C en-dessous de la température limite de confort de 20°C, soit 72 Dh. Cette limite peut être considérée comme sévère vu que nous sommes en régime de chauffage intermittent. Pour cette raison, les degrés-heures sont également comparés à la limite des 410 Dh, qui correspond au temps de fonctionnement du chauffage en température de consigne économique (18°C) pendant la période étudiée avec une limite maximale de 2°C de différence par rapport à la température limite de confort. *A contrario*, il est considéré comme étant mauvais dans une situation où l'on a de l'inconfort sur l'ensemble de la période étudiée avec 2°C de différence en-dessous de notre température limite de confort, soit 720 Dh.

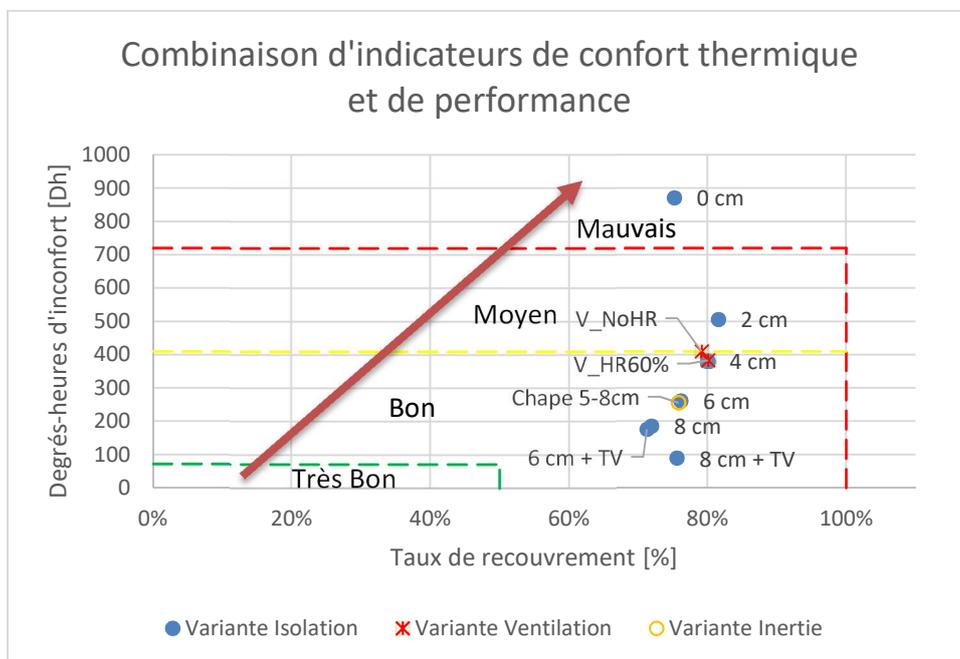
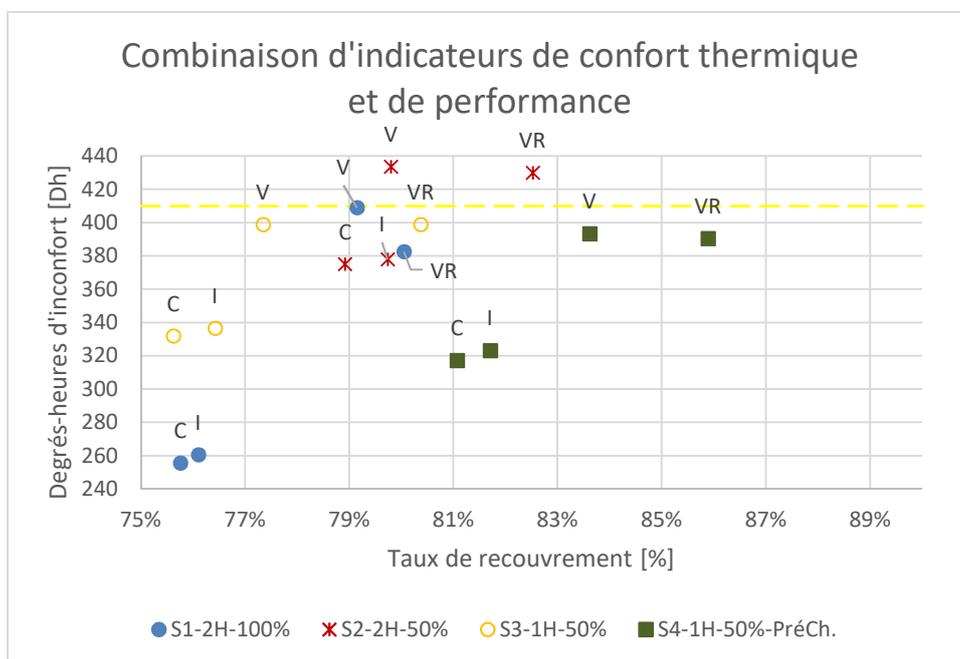


Figure 53 Combinaison des taux de recouvrement avec les degrés-heures pour l'ensemble des variantes d'isolation, de ventilation et de d'inertie thermique pour le premier scénario de coupure.

D'après la figure 53, excepté le bâtiment non-isolé, l'ensemble des variantes sont considérés comme ayant des résultats bons à moyens. Les taux de recouvrement se situent dans une fourchette restreinte comprise entre 71% et 82%. Aucune des variantes ne se situe en-dessous des 72 Dh, même si les

résultats des 3 niveaux d'isolation les plus performants s'en rapprochent fortement (88 Dh pour le meilleur des cas). Les variantes d'isolation à partir de 6 cm avec double vitrage et les variantes d'inertie thermique sont néanmoins bien en-dessous de notre limite de 410 Dh avec un maximum de 255 Dh. Les variantes d'isolation avec 2 cm et 4 cm d'isolant réalisent les moins bons résultats en gravitant autour de la limite des 410 Dh.

Analysons à présent les résultats des degrés-heures d'inconfort sous l'angle des 4 scénarios de coupure (voir figure 54). De par les critères que nous avons fixés, les résultats sont également considérés comme étant bons à moyens. Les taux de recouvrements se retrouvent cette fois dans une fourchette comprise entre 76% et 86%. Les scénarios 1, 3 et 4 ont un nombre de degrés-heures d'inconfort compris entre 255 et 336, excepté pour leurs variantes de ventilation. Le nombre de degrés-heures de l'ensemble du scénario 2 ainsi que toutes les variantes de ventilation sont proches de notre limite de 410 Dh (entre 374 et 433).



Légende	
I	Variante isolation 6 cm
C	Variante de masse thermique (Chape 8 cm)
V	Variante de ventilation sans récupération de chaleur
VR	Variante de ventilation avec récupération de chaleur

Figure 54 Combinaison des taux de recouvrement avec les degrés-heures pour l'ensemble des scénarios de coupure. Les variantes d'isolation ont été limitées au cas de 6 cm d'isolant avec double vitrage. Les variantes de masse thermique ont été limitées au cas de la chape de 8 cm.

4 Discussion

Afin de pouvoir mobiliser un bâtiment ancien dans un programme de PtH et de maximiser son potentiel de flexibilité, il est essentiel de passer par une phase de rénovation. Outre ses besoins en chauffage très importants (de l'ordre de 27.8 MWh/an), le bâtiment non-isolé que nous avons étudié présente des problèmes de confort thermique conséquents, et cela même sans application de stratégies de coupures. À la limite de température de confort de 19°C, il faut compter sur un niveau d'isolation d'au moins 4 à 6 cm pour pouvoir atteindre un temps sans inconfort moyen proche du temps de coupure appliqué. À la limite de température de confort de 20°C, il faut au moins 6 cm pour avoir des résultats globalement satisfaisants pour les différentes stratégies de coupure étudiées. Si les niveaux d'isolation de 8 cm (avec ou sans triple vitrage) se révèle être performant, il faut néanmoins prendre en compte la petite superficie du bâtiment étudié. Par conséquent, il serait intéressant de privilégier la pose de triple vitrage quitte à diminuer l'épaisseur de l'isolant. À ce titre, le bâtiment avec une isolation de 6 cm avec triple vitrage obtient des temps de coupure sans inconfort légèrement supérieurs à celui de 8 cm avec double vitrage.

Dans l'hypothèse où l'on rénove le bâtiment d'origine (non-isolé) avec une couche d'isolation de 6 cm en laissant le double-vitrage et en remplaçant le système de chauffage considéré être à l'origine comme étant une chaudière au mazout¹² par une pompe à chaleur air-eau de 3 kW_{th}¹³, le coût de l'investissement pourrait s'élever aux environs des 9000 € selon certains prix indicatifs¹⁴, sans déduction des primes pour l'isolation et pour l'installation d'une pompe à chaleur. Passant d'un besoin en chauffage annuel de l'ordre de 23.6 MWh à un besoin de 3.7 MWh, l'économie réalisée en termes de consommation pourrait s'élever à près de 1300€/an en considérant le rendement et le coefficient de performance saisonnier respectif de chaque système et en se référant aux prix indicatifs de l'énergie au mois de mars 2017¹⁵. En participant à un programme de gestion de coupure de la pompe à chaleur, les économies pourraient être encore plus importantes. Entre environ 7.5€ et 16€ pourraient être épargnés sur le mois de janvier selon que l'on effectue une coupure de 1 ou de 2 heures.

Si les variantes d'isolation ont montré un potentiel d'amélioration conséquent en termes de flexibilité au niveau du bâtiment, il n'en va pas de même pour les variantes de ventilation et de modification de la masse thermique que nous avons étudiées. Les deux variantes de ventilation analysées (avec et sans récupération de chaleur) font chuter la température opérative bien plus rapidement sous les limites de confort fixées ; les vitesses de chute de température varient environ du double au quintuple par rapport à un cas sans ventilation. Les variantes de masse thermique quant à elles se sont révélées inefficaces. Il serait toutefois intéressant de réaliser des études complémentaires concernant ces variantes afin d'analyser des scénarios alternatifs qui permettraient de faire rentrer ce types de systèmes dans un tel programme.

L'impact énergétique et la surconsommation sont directement liés à la performance énergétique du bâtiment. Plus le niveau d'isolation est important, moins ces deux indicateurs sont importants.

¹² Chaudière au mazout avec un rendement global de 80% [87]

¹³ Pompe à chaleur avec un COP saisonnier de 2.6 [47][88] et un COP moyen durant le mois de janvier considéré à 2.3 [89][90] pour une température moyenne proche des 0°C.

¹⁴ Sur base des prix indicatifs suivants : isolation du sol 22€/m², isolation des murs par l'intérieur 40€/m², isolation des combles 27€/m², une pompe à chaleur air-eau 4700€ (pose comprise, HTVA) [91][92][93][94][95]

¹⁵ Sur base d'un coût de l'énergie de 5.6 cEUR/kWh pour le mazout et de 26.8 cEUR/kWh pour l'électricité au mois de mars 2017 en Wallonie.[96]

Toutefois, il faut recadrer cette affirmation en tenant compte des contraintes de confort. Les coupures engendrent moins de problèmes de confort thermique dans les cas les mieux isolés. Si dans la majorité des cas, le taux de recouvrement est meilleur dans les meilleurs niveaux d'isolation, il y a certaines exceptions observées dans le moins bon et le meilleur cas, liées notamment au surdimensionnement appliqué.

Si nous considérons un parc de 2000 bâtiments tels que notre bâtiment de référence (soit un peu moins de 1% de rénovation de ce type de bâtiments), rénovés avec la même hypothèse qu'évoqué dans le paragraphe précédent, et en utilisant un COP moyen de 2.3 pour le mois de janvier, nous pourrions obtenir un effacement moyen de la consommation compris entre de l'ordre de 1.1 MWh à 2.8 MWh durant une coupure de 1 ou 2 heures. L'effet de report moyen causé par la surconsommation après la reprise de la chauffe à température de consigne de confort s'élève quant à lui entre 1 MWh et 2.4 MWh. Enfin, si nous considérons la période de préchauffe à une température de consigne de 22°C comme étant un moyen de stockage de charges résiduelles, un parc de 2000 bâtiments pourrait absorber de l'ordre 0.4 MWh sur une heure de préchauffe¹⁶. À titre de comparaison avec d'autres moyens de stockage résidentiels, un ballon de stockage d'eau chaude sanitaire (ECS) pourrait, d'après un calcul simplifié, stocker jusqu'à 7 kWh_{th} par jour¹⁷ (14 MWh_{th} pour un parc de 2000 bâtiments) ou encore une batterie de type Li-ion (investissement de l'ordre de 7000€) permettrait selon certains constructeurs de stocker jusqu'à 15 kWh par jour (30 MWh pour un stock de 2000 bâtiments) [82]. Enfin, comparons ces chiffres avec quelques données du système électrique. Selon les données fournies par Elia, la puissance demandée lors du pic de consommation le 18 janvier 2017 vers 17h s'est élevé à près de 13000 MW [83]. Le système électrique belge en 2017 a une capacité flexible de l'ordre de 3500 MW et une réserve stratégique de 750 MW [84]. Enfin toujours selon Elia, nous pourrions avoir des surproductions pouvant atteindre 5000 MW à certaines heures de l'année à l'horizon 2021 [84]. Comparé à ces différents chiffres, la flexibilité de notre bâtiment, de par les variantes étudiées, peut sembler limitée du côté du système électrique, même avec un parc de bâtiments plus important. Au-delà de l'inertie du bâtiment, il serait dès lors intéressant de mener des études complémentaires sur l'utilisation d'autres systèmes afin d'augmenter ce potentiel (p.ex. ballons de stockage pour le chauffage, ballon de stockage d'ECS, ballons thermodynamiques, planchers chauffants etc.).

Outre la prise en considération de la performance énergétique d'un bâtiment, l'élaboration d'un scénario de coupure, accompagnée ou non d'une période de préchauffe, doit absolument tenir compte de l'importance des gains internes. Ces derniers ont un impact important sur le confort thermique et son évolution lors de l'application d'une stratégie de coupure, et il est d'autant plus important dans les niveaux isolation plus performants. Le scénario 2 nous a montré qu'une coupure de 2 heures avec une occupation moindre du bâtiment provoque de plus nombreuses situation d'inconfort thermique. Il est dans ce cas nécessaire d'appliquer des temps de coupure plus courts (1h, voire moins) voire de préchauffer à une température de consigne plus élevée afin de réduire ces problèmes d'inconfort.

¹⁶ Notons toutefois que tous les scénarios qui ont été étudiés se produisent entre 17h et 20h, qui correspond généralement à la période du pic de consommation journalier. Pour parler de stockage de charges résiduelles à proprement parler il faudrait déplacer le scénario de préchauffe-coupure à une tranche horaire différente, là où il y a plus de chance d'avoir une surproduction d'électricité.

¹⁷ Si l'on considère 40l/j par personne, 4 personnes et une différence de température de 40°C entre l'eau de distribution et l'eau chaude.

L'étude qui a été menée s'est effectuée sur la deuxième partie du mois de janvier et cela avec plusieurs simplifications au niveau du modèle. L'étude devrait être complétée sur plusieurs aspects. Premièrement, il serait intéressant de la mener sur une année entière, ce qui permettrait de voir l'évolution du potentiel de flexibilité sur l'ensemble de cette période. Deuxièmement, l'étude d'un modèle plus élaboré permettrait d'obtenir des chiffres plus précis. Il serait intéressant d'inclure une modélisation du système de chauffe entier comprenant une PAC, les émetteurs et les différents auxiliaires (p.ex. pompes). Ceci permettrait notamment de prendre en compte le coefficient de performance de la PAC ainsi que de son évolution en fonction des conditions climatiques. Troisièmement, certains paramétrages nécessitent d'être optimisés. Les surdimensionnements appliqués au niveau de la puissance de chauffe peuvent avoir un impact sur les taux de recouvrement. Le fait d'avoir calculé les surdimensionnements avec la norme EN 12831, rendent ceux-ci proportionnellement plus importants pour les niveaux d'isolation les meilleurs, ce qui a un impact négatif sur le taux de recouvrement. Quatrièmement, les indicateurs de confort thermiques se sont limités à l'étude d'une seule zone thermique (le salon). Il serait intéressant d'inclure d'autres zones afin de compléter cet aspect de l'étude. Enfin cinquièmement, nous nous sommes essentiellement concentrés sur l'impact d'une gestion de coupure de chauffage au niveau du bâtiment, une étude complémentaire devrait être menée pour voir l'impact de manière plus approfondie du point de vue du réseau électrique tant au niveau énergétique qu'économique.

S'il y a des bénéfices indéniables pour le consommateur à investir dans l'isolation thermique de son bâtiment, l'installation d'une pompe à chaleur dans le type de bâtiment de référence que nous avons choisi pourrait constituer une limite. Outre l'investissement plus important que cela peut constituer par rapport à d'autres systèmes de chauffage, les pompes à chaleur travaillent habituellement en régime de basse, voire très basse, température. Une perte de superficie causée par le niveau d'isolation appliquée et le surdimensionnement de radiateurs ou encore la pose d'un plancher chauffant peuvent s'avérer être des obstacles pour de tels bâtiments. Enfin, la fluctuation des prix de l'énergie année après année font que le bénéfice côté coût de l'énergie n'est pas toujours présent, ce qui constitue une limite supplémentaire. Le niveau de rénovation ainsi que la décision d'installer une PAC sera conditionnée par le niveau de revenus du consommateur/propriétaire et les politiques d'incitation qui sont ou seront menées. Les primes de bases en RW (à pondérer en fonction du niveau de revenu) tournent aujourd'hui entre 2 et 5 €/m² pour l'isolation du toit (max 100 m²), 8€/m² pour l'isolation intérieure (max 100 m²), 8€/m² pour le sol (max 100 m²) et 800€ pour une PAC chauffage et ECS [85].

Conclusion

Nous avons vu que la constante augmentation de la demande en électricité, l'arrivée de nouveaux usages électriques et l'intégration sans cesse plus importante d'énergies renouvelables mettent les systèmes électriques sous pression. Ceci a pour conséquence de rendre la gestion de l'adéquation entre la production et la demande d'électricité de plus en plus complexe. Les concepts de *Smart Grids* ou de *Power-To-X* tentent de trouver des solutions en rendant la demande plus flexible et en trouvant de nouvelles formes de stockage de l'électricité notamment au travers d'autres secteurs énergétiques. Plus particulièrement le but du *Power-To-Heat* est de stocker de l'électricité sous forme de chaleur par le moyen de PAC dans le but d'alimenter des réseaux de chaleurs ou de chauffer directement des bâtiments.

À cette fin, nous avons étudié le potentiel de contribution du bâti wallon au travers de l'analyse de la flexibilité de la demande en chauffage d'un bâtiment de référence. Après analyse du parc immobilier wallon et suite à la définition des critères de sélection, nous avons décidé d'étudier un bâtiment hautement représentatif du bâti wallon. La typologie de bâtiment la plus représentée en RW est un bâtiment mitoyen bâti avant 1946 (24%). À ce titre nous avons sélectionné un bâtiment de type maison d'ouvrier qui représente à lui seul 17% du bâti wallon. Si ces bâtiments sont très représentatifs, ils nécessitent néanmoins une rénovation importante afin de pouvoir utiliser une pompe à chaleur.

Le bâtiment a été modélisé dans le logiciel TRNSYS afin d'étudier son comportement thermique par simulations dynamiques dans le cadre d'une gestion de coupure (mise en température de consigne économique) de son système de chauffe et ce dans le but d'évaluer la flexibilité de sa demande en chauffage. En premier temps nous avons configuré le modèle du bâtiment dans le logiciel et nous avons déterminé ses paramètres de fonctionnement, comme par exemple son régime de chauffage intermittent avec les températures de consigne de 18°C et 21°C. Nous avons ensuite défini 4 scénarios de coupure de chauffage : une coupure de 2h avec 100% d'occupation (S1-2H-100%), une coupure de 2H avec 50% d'occupation (S2-2H-50%), une coupure de 1h avec 50% d'occupation (S3-1H-50%) et une coupure de 1h avec 50% d'occupation avec une préchauffe d'une 1h à une température consigne de 22°C avant la coupure. La flexibilité a été évaluée par des indicateurs énergétiques et de confort thermique: le temps sans inconfort durant un arrêt de chauffage, les degrés-heures d'inconfort, l'impact énergétique, la surconsommation et le taux de recouvrement. Enfin, l'étude de ces 4 scénarios de coupure de chauffage a été déclinée en 3 grandes variantes: variantes de différents niveaux d'isolation, variantes de système de ventilation et variantes de masse thermique du bâtiment. La période étudiée s'est concentrée sur la dernière quinzaine du mois de janvier.

Les résultats pour les variantes d'isolation nous ont montré qu'il était possible de déplacer certaines charges liées à sa consommation de chauffage tout en limitant l'impact sur le confort thermique de l'occupant. Pour un niveau d'isolation de 6 cm avec du double vitrage, la température opérative reste au-dessus de la température limite de confort de 20°C durant un temps moyen fort proche du temps de coupure qui a été appliqué (1 ou 2h), excepté pour le scénario de coupure de 2h avec une occupation moindre de 50% (S2-2H-50%). L'augmentation du nombre de degrés-heures d'inconfort par rapport à une température limite de confort de 20°C pour un scénario de 2 h avec 100% d'occupation y est de l'ordre de 50 Dh. Avec un système de chauffage avec 100% de rendement, l'impact énergétique moyen durant la période étudiée se situe aux alentours des 3.2 kWh pour une coupure de 2h, ce qui représente un effacement de 15% de la consommation quotidienne moyenne.

La surconsommation qui suit la relance après la coupure s'élève à 2.5 kWh en moyenne, ce qui a pour conséquence d'avoir un taux de recouvrement de 76%.

Les différents scénarios de coupure mettent en évidence l'importance des gains internes dans la mise en place d'une stratégie de coupure pour le bâtiment étudié. Le scénario de coupure de 2h avec 50% d'occupation montre des problèmes de confort thermique importants par rapport au premier scénario (2h et 100% d'occupation). Dans un cas d'occupation moindre, l'application d'une période de coupure plus courte (1h) permet de limiter les problèmes d'inconfort et de limiter la chute de température avant la reprise. En outre, préchauffer pendant une heure à une température de 22°C avant la coupure permet d'allonger encore le temps sans inconfort. Nous observons toutefois des taux de recouvrements moins performants (systématiquement au-delà de 80%) dû à une surconsommation plus importante dans ces scénarios. Pour un niveau d'isolation de 6 cm avec double vitrage, la surconsommation moyenne durant cette heure de préchauffe s'élève à 435 Wh.

Les variantes de ventilation ont montré d'importants problèmes d'inconfort thermique, la vitesse de chute de température étant bien plus importante (d'environ 2 à 5 fois plus importante). Seul le scénario de ventilation avec récupération de chaleur (avec un rendement de 60%) présente des temps sans inconfort durant la coupure estimés corrects (proche du temps de coupure de 1 ou 2h) mais seulement à une limite de température de confort de 19°C. Le nombre de degrés-heures a augmenté entre 46% et 57% par rapport à un cas non-ventilé. D'autres scénarios devraient être étudiés (p.ex. avec des temps de coupure plus courts) afin de pouvoir prendre en compte les bâtiments ventilés dans des programmes de gestion de coupure.

Les variantes de masse thermique n'ont pas amélioré de façon significative la flexibilité du bâtiment ni en termes énergétiques, ni en termes de confort thermique.

Un parc de 2000 bâtiments tels que notre bâtiment de référence, rénovés avec une couche de 6 cm d'isolant et équipés d'une pompe à chaleur avec un COP moyen de 2.3 durant la période étudiée permettrait d'atteindre un effacement moyen compris entre 1.1 MWh et 2.8 MWh pour respectivement 1 h et 2 h de coupure de chauffage. Si on considère une heure de préchauffe à une température de consigne supérieure de 1°C (22°C) comme étant un moyen d'absorber des surproductions au niveau du réseau, de l'ordre de 0.4 MWh de charges résiduelles pourraient être absorbées par cette voie.

Nous nous sommes focalisés à étudier la flexibilité de la demande de chauffage en nous limitant à utiliser l'enveloppe du bâtiment comme seul moyen de stockage. Si la flexibilité a pu être attestée au niveau du bâtiment par rapport à des contraintes de confort thermique, l'impact d'un parc de 2000 bâtiments tels que le bâtiment de référence étudié au niveau du réseau électrique peut sembler limité, surtout dans sa capacité à absorber des charges résiduelles. En outre, nous avons discuté certaines limites pouvant être un obstacle à l'intégration d'un tel bâtiment dans un programme de gestion de la demande du chauffage. L'investissement important que peut constituer les frais d'isolation et l'installation de la pompe à chaleur, la perte de surface due à la pose d'une isolation intérieure dans un bâtiment de petite superficie sont autant de limites à prendre en compte. Il semble dès lors intéressant de mener des études complémentaires. Pour cette raison, d'autres variantes systèmes pourraient être envisagées afin d'augmenter la flexibilité en terme de quantité d'énergie déplacée notamment par l'utilisation d'un ballon de stockage (pour chauffage ou ECS), la mise en place d'un ballon thermodynamique ou encore l'utilisation d'un émetteur à forte inertie tel qu'un plancher chauffant.

Bibliographie

- [1] European Environment Agency, "Primary energy consumption by fuel," 2016. [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/primary-energy-consumption-by-fuel-6/assessment-1>. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [2] Eurostat, "Dépendance énergétique dans l'UE," 2016. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7150390/8-04022016-AP-FR.pdf>. [Accessed: 11-Apr-2017].
- [3] Knoema, "BP: World Reserves of Fossil Fuels." [Online]. Available: <http://knoema.fr/smsfgud/bp-world-reserves-of-fossil-fuels>. [Accessed: 10-Aug-2017].
- [4] Ademe, "Perspectives énergétiques mondiales," 2013.
- [5] Connaissance des énergies, "L'énergie dans le monde en 2035 : à quoi faut-il s'attendre ?" [Online]. Available: <http://www.connaissancedesenergies.org/lenergie-dans-le-monde-en-2035-quoi-faut-il-sattendre-150225>. [Accessed: 11-Apr-2017].
- [6] United Nations, "Climat : un nombre record de 175 pays signent l'Accord de Paris au siège de l'ONU, à New York," 2016. [Online]. Available: <http://www.un.org/apps/newsFr/storyF.asp?NewsID=37082>. [Accessed: 11-Apr-2017].
- [7] Commission européenne, "Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020," 2017. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr.
- [8] Commission européenne, "Cadre pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030," 2017. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_fr. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [9] Commission européenne, "Feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050: vers un secteur énergétique sûr, compétitif et «décarboné»,” 2017. [Online]. Available: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-11-1543_fr.htm. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [10] Union européenne, "Énergie," 2017. [Online]. Available: https://europa.eu/european-union/topics/energy_fr. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [11] Elia, "Rapport annuel - L'intégration des énergies renouvelables," 2013.
- [12] Energiguide, "C'est quoi un réseau électrique intelligent ?," 2016. [Online]. Available: <https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/cest-quoi-un-reseau-electrique-intelligent/1581/>. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [13] Joint Research Center, "Smart Grid Projects Outlook 2014," 2014. [Online]. Available: <http://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-grids-observatory>. [Accessed: 11-Apr-2017].
- [14] Commission de régulation de l'énergie, "Définition des Smart grids." [Online]. Available: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=definition-smart-grids>. [Accessed: 27-Jul-2017].
- [15] Open Data Soft, "SMART GRIDS : LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES À L'HEURE DE LA RÉVOLUTION DES DONNÉES," 2016. [Online]. Available: <https://www.opendatasoft.fr/2016/11/22/smart-grids-les-reseaux-electriques-a-lheure-de-la-revolution-des-donnees/>. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [16] Interreg Grande Région, "Programme de coopération Interreg V A France - Belgique - Allemagne - Luxembourg 'Grande Région 2014-2020,'" 2014.
- [17] Technische Universität Kaiserslautern, "PTH4GR²ID," 2017. [Online]. Available: <https://www.eit.uni-kl.de/en/ese/research/distribution-systems/pth4gr2id/>. [Accessed: 12-May-2017].

- [18] P. André, "PtH4GR²ID. General presentation of the project.," 2016.
- [19] Rheinland-Pfalz, "Energie-Projekt gestartet." [Online]. Available: <https://www.rlp.de/de/aktuelles/einzelsicht/news/detail/News/energie-projekt-gestartet/>. [Accessed: 12-May-2017].
- [20] M. R. Hossain, *Smart Grids*. 2013.
- [21] Connaissance énergie, "Quelle est la différence entre réseau de transport d'électricité et réseau de distribution." [Online]. Available: <http://www.connaissancedesenergies.org/quelle-est-la-difference-entre-reseau-de-transport-d-electricite-et-reseau-de-distribution>. [Accessed: 19-Jul-2017].
- [22] H. Nourredine, "Des réseaux électriques aux « Smartgrids »,," 2000.
- [23] G. Guérard, "Optimisation de la diffusion de l'énergie dans les smart-grids," 2015.
- [24] A. B. M. S. Ali and S. Azad, "Smart Grids," 2013.
- [25] G. M. Shafiullah, A. M. T. Oo, A. B. M. S. Ali, P. Wolfs, and M. T. Arif, *Smart Grids*. London: Springer London, 2013.
- [26] Commission de régulation de l'énergie, "La flexibilité de la demande." [Online]. Available: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=flexibilite-demande>. [Accessed: 27-Jul-2017].
- [27] S. G. Hauser and K. Crandall, *Chapter 1 - Smart Grid Is a Lot More than Just "Technology."* Elsevier Inc., 2012.
- [28] Commission de régulation de l'énergie, "Le contexte énergétique allemand." [Online]. Available: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=allemagne>. [Accessed: 23-Jul-2017].
- [29] DREAL Provence Alpes - Côte d'Azur, "Définition d'un smart grid, réseau électrique intelligent." [Online]. Available: <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/definition-d-un-smart-grid-reseau-electrique-a8779.html>. [Accessed: 19-Jul-2017].
- [30] P. Warren, "A review of demand-side management policy in the UK," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 941–951, Jan. 2014.
- [31] Commission de régulation de l'énergie, "L'intégration des EnR / Les technologies de Smart grids : une réponse pour faciliter l'intégration des EnR sur les réseaux électriques." [Online]. Available: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationenr-smart-grids>. [Accessed: 27-Jul-2017].
- [32] C. Beard, *Smart Grids for Dummies*. 2010.
- [33] Commission de régulation de l'énergie, "Le contexte de développement du stockage." [Online]. Available: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage>. [Accessed: 28-Jul-2017].
- [34] Leopoldina, Acatech, and Union der akademien der wissenschaften, *Flexibility concepts for the German power supply in 2050*, no. February. 2016.
- [35] M. Sterner, "Power-to-X - results from various projects on cross-sectoral energy storage and network coupling," 2016.
- [36] P. Odrů, "Stockage de la chaleur," *Tech. l'ingénieur*, vol. 33, no. 0, 2017.
- [37] P. Pardo, "Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermo-chimique," 2013.
- [38] F. Munaretto, "Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments.," 2014.

- [39] Euroméditerranée, "Inertie thermique dans le bâtiment," pp. 1–6, 2010.
- [40] A. Pecourt, "Inertie dans les bâtiments passifs - constante de temps," 2014.
- [41] Energie Plus, "L'inertie thermique." [Online]. Available: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10330>. [Accessed: 17-Jul-2017].
- [42] C.-A. Roulet, *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. 2004.
- [43] Ecosources, "Inertie thermique." [Online]. Available: http://www.ecosources.info/dossiers/Inertie_thermique. [Accessed: 17-Jul-2017].
- [44] ADEME, "Les systèmes de stockage d'énergie," 2011.
- [45] Energie Plus, "Les pompes à chaleur." [Online]. Available: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15563#c9670>. [Accessed: 07-Jul-2017].
- [46] SPW Énergie, "Les pompes à chaleur," 2010.
- [47] EF4, "Pompes à chaleur." [Online]. Available: <http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/>. [Accessed: 25-Jun-2017].
- [48] ABCCLim, "Diagramme de Mollier." [Online]. Available: <http://www.abcclim.net/diagramme-mollier.html>. [Accessed: 08-Jul-2017].
- [49] ABCCLim, "COP ou coefficient de performance." [Online]. Available: <http://www.abcclim.net/cop.html>. [Accessed: 09-Jul-2017].
- [50] M. Dejan, A. Vranjes, and P. Vasiljevic, "Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating / cooling purposes," vol. 42, pp. 649–657, 2010.
- [51] Euroserv'er, "Baromètre Pompes À Chaleur," pp. 1–14, 2016.
- [52] SPF Économie, "Construction et industrie." [Online]. Available: http://statbel.fgov.be/fr/statistiques/chiffres/economie/construction_industrie/. [Accessed: 20-Feb-2017].
- [53] G. Fallon, "Pompes à chaleur," pp. 1–24, 2012.
- [54] E. Berta, E. Davin, P. Andre, and B. March, "Smart Micro Cogen WP1 Report : Definition of typical buildings covered by the research," 2014.
- [55] E. Georges, S. Gendebien, S. Bertagnolio, B. Dechesne, and V. Lemort, "ProCEBar. Final report.," 2013.
- [56] SPW, UMONS, ULg, and 3E, "CO-ZEB Rapport final du projet," 2013.
- [57] BEMS, ELIOSYS, 3E, Région Wallonne, Lampiris, ULg, ULB, and Haute École de la Province de Liège, "Flexipac Rapport final," 2011.
- [58] M. Opdebeeck and A. De Herde, "Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie," 2014.
- [59] Tabula and Episcopo, "Tabula Webtool." [Online]. Available: <http://webtool.building-typology.eu>. [Accessed: 21-Feb-2017].
- [60] M. Opdebeeck and A. de Herde, "Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie. Chapitre 4 Analyse du bâti," 2014.
- [61] SPW Énergie, "Exigences PEB," 2016.
- [62] BEMS, "TRNSYS. A Transient system simulation tool.," 2015.
- [63] E. Davin and P. Andre, "Rapport Smart Micro Cogen WP2 Identification des profils

- caractéristiques de consommations (chauffage , consommations électriques) dans les bâtiments,” pp. 1–25, 2014.
- [64] BEMS, “Profil de gains IEA58.” 2015.
- [65] BEMS, “Profil de gains vallenergie.” 2014.
- [66] Energie Plus, “Dimensionner une installation de chauffage : principes généraux.” [Online]. Available: <http://sites.uclouvain.be/energie-plus/index.php?id=17072>. [Accessed: 26-May-2017].
- [67] CSTC, “Calcul des déperditions calorifiques des bâtiments Catalogue de valeurs U indicatives pour un certain nombre de parois courantes,” 2015.
- [68] C. Delmotte, “Méthode de calcul des déperditions calorifiques de base,” 2015.
- [69] LEHR, “RENOVATION BASSE ENERGIE. CHAUFFAGE.,” 2009.
- [70] Energie Plus, “Le calcul des déperditions et de dimensionnement des installations de chauffage.” [Online]. Available: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10993#c4076+c4078+c4077>. [Accessed: 30-Jun-2017].
- [71] L. Peeters, J. Van der Veken, H. Hens, and L. Helsen, “Sizing of boilers for residential buildings,” *Proc. Clima2007 Conf.*, 2007.
- [72] ASHRAE, “ASHRAE 90.1 Appendix G. Building Performance Rating Method,” 2004.
- [73] Lampiris, “Ensemble, limitons le risque d’une éventuelle pénurie d’électricité,” 2015. [Online]. Available: <https://www.lampiris.be/fr/ensemble-limitons-le-risque-dune-eventuelle-penurie-delectricite>. [Accessed: 29-May-2017].
- [74] EDF, “Pics de consommation en hiver,” 2017. [Online]. Available: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/pics-de-consommation-electrique-en-hiver>. [Accessed: 15-May-2017].
- [75] D. Da Silva, “Analyse de la flexibilité des usages électriques résidentiels : application aux usages thermiques,” *L’École nationale supérieure des mines de Paris*, 2011.
- [76] Energie Plus, “Le confort thermique.” [Online]. Available: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10250#c20964503+c2914+c20964513>. [Accessed: 20-Feb-2017].
- [77] Center for the Built Environment - University of Berkeley, “CBE Thermal Comfort Tool,” 2013. [Online]. Available: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>. [Accessed: 16-Jun-2017].
- [78] A. Thewes, “BLOWER-DOOR TEST Laboratory : measurement techniques,” 2012.
- [79] Eurabo, “n50,” 2008. [Online]. Available: <http://www.eurabo.be/fr/lexicon/detail/Valeur-n50/566>. [Accessed: 16-Jun-2017].
- [80] J.-M. Hauglustaine and F. Simon, “La ventilation et l’énergie - Guide pratique pour les architectes,” p. 14, 2006.
- [81] J.-M. Hauglustaine and F. Simon, “La ventilation et l’énergie - Guide pratique pour les architectes. Annexe 4 : La norme NBN D50-001 et la réglementation wallonne.,” pp. 1–10, 2006.
- [82] Tesla, “Powerwall.” [Online]. Available: https://www.tesla.com/fr_BE/powerwall. [Accessed: 09-Aug-2017].
- [83] Elia, “Charge du réseau Elia.” [Online]. Available: <http://www.elia.be/fr/grid-data/Charge-du-reseau-et-previsions-de-charge/Charge-du-reseau-Elia>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [84] Elia, “Étude de l’adéquation et estimation du besoin de flexibilité du système électrique belge.

Période 2017-2027.," 2016.

- [85] SPW énergie, "Prime énergie à partir du 1er avril 2015." [Online]. Available: <https://energie.wallonie.be/fr/primes-energie-a-partir-du-1er-avril-2015.html?IDC=8793>. [Accessed: 09-Aug-2017].
- [86] Afnor, "Extrait de la NF EN 12831 de Mars 2004 concernant la surpuissance de relance dans les calculs de," 2004.
- [87] EnergiePlus, "Les rendements d'une installation de chauffage central." [Online]. Available: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10988#c5064>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [88] ofgem, "Seasonal Performance Factor." [Online]. Available: <https://www.ofgem.gov.uk/key-term-explained/seasonal-performance-factor-spf>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [89] Franklin Energy, "Air Source Heat Pump Efficiency Gains from Low Ambient Temperature Operation Using Supplemental Electric Heating," 2011. [Online]. Available: <http://www.franklinenergy.com/wp-content/uploads/2014/10/AirSource-Heat-Pump-Efficiency-Gains-2011.pdf>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [90] Federation of European Heating Ventilation and Air Conditioning Associations, "Heat pumps in refurbishment of existing buildings - full version." [Online]. Available: <http://www.rehva.eu/publications-and-resources/rehva-journal/2012/062012/heat-pumps-in-refurbishment-of-existing-buildings-full-version.html>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [91] Livios, "Prix indicatifs isolation." [Online]. Available: <http://www.livios.be/fr/info-construction/gros-oeuvre/isolation/prix-indicatifs-isolation/>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [92] Livios, "Que coûte une isolation au sol avec du PUR pulvérisé ?" [Online]. Available: <http://www.livios.be/fr/info-construction/gros-oeuvre/isolation/isolation-du-sol/que-coute-une-isolation-au-sol-avec-du-pur-pulverise/>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [93] Travaux.com, "Coût des travaux d'isolation, TVA et aides diverses." [Online]. Available: <http://www.travaux.com/dossier/isolation/81/Cout-des-travaux-d-isolation-TVA-et-aides-diverses.html>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [94] SOLVARI, "Prix pompe à chaleur." [Online]. Available: <https://www.solvari.be/fr/information/prix-pompe-a-chaleur>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [95] Chauffage-info.be, "Prix pompe à chaleur." [Online]. Available: <https://www.chauffage-info.be/pompe-a-chaleur/prix-pompe-a-chaleur>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [96] Apere, "Observatoire des prix," 2017. [Online]. Available: <http://www.apere.org/fr/observatoire-des-prix>. [Accessed: 07-Aug-2017].

ANNEXE A: Scénarios d'occupation et profils de gains internes

Les tableaux 36 à 39 contiennent respectivement le profil des gains internes des occupants, de l'éclairage, de l'utilisation des appareils électriques et des consignes de température.

Profil de gains - Occupation des pièces								
	6h-8h	8h-15h	15h-17h	17h-19h	19h-20h	20h-22h	22h-23h	23h-6h
Cuisine	assis, repas	absence	assis, repas	absence	travail léger	absence	absence	absence
Salon	assis, repas	absence	assis, repas	assis au repc	assis au repc	assis, repas	absence	absence
Chambre 1	absence	absence	travail écrit	absence	absence	absence	assis au repc	assis au repos
Chambre 2	absence	absence	absence	absence	absence	absence	assis au repc	assis au repos
Salle de bain	travail léger	absence	absence	absence	absence	absence	absence	absence
Profil de gains - Apports des occupants [W]								
plage horaire	6h-8h	8h-15h	15h-17h	17h-19h	19h-20h	20h-22h	22h-23h	23h-6h
Cuisine	170	0	170	0	185	0	0	0
Salon	170	0	170	400	300	680	0	0
Chambre 1	0	0	120	0	0	0	100	100
Chambre 2	0	0	0	0	0	0	200	200
Salle de bain	185	0	0	0	0	0	0	0
Total	525	0	460	400	485	680	400	400

Tableau 36 Profil de gains : occupation du bâtiment

Profil de gains - Éclairage [W]								
	6h-8h	8h-15h	15h-17h	17h-19h	19h-20h	20h-22h	22h-23h	23h-6h
Cuisine	30	0	0	0	30	0	0	0
Salon	62	0	0	62	62	62	0	0
Buanderie	0	0	0	0	0	0	0	0
Chambre 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Chambre 2	0	0	0	0	0	0	0	0
Salle de bain	25	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 37 Profil de gains : éclairage

Profils de gains - Utilisation des appareils								
	6h-8h	8h-15h	15h-17h	17h-19h	19h-20h	20h-22h	22h-23h	23h-6h
cuisine	Réfrigérateur							
cuisine	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Cuisson	Aucune	Aucune	Aucune
salon	Télévision veille	Télévision veille	Télévision veille	Télévision	Télévision veille	Télévision	Télévision	Télévision veille
salon	Ordinateur veille	Ordinateur veille	Ordinateur	Ordinateur veille				
Profils de gains - Puissance des appareils [W]								
	6h-8h	8h-15h	15h-17h	17h-19h	19h-20h	20h-22h	22h-23h	23h-6h
Cuisine / Réfrigérateur	30	30	30	30	30	30	30	30
Cuisine / Cuisson	0	0	0	0	1500	0	0	0
Salon / Télévision	1	1	1	275	1	275	275	1
Salon / Ordinateur	25	25	100	25	25	25	25	25
Total	56	56	131	330	1556	330	330	56

Tableau 38 Profil de gains : appareils électriques

Profil des consignes de température								
	6h-8h	8h-15h	15-17h	17-19h	19-20h	20h-22h	22h-23h	23h-6h
Semaine	21°C	18°C	21°C	21°C	21°C	21°C	18°C	18°C
Week-end	18°C	21°C	21°C	21°C	21°C	21°C	18°C	18°C

Tableau 39 Profil des consignes de température

ANNEXE B: Dimensionnement de la puissance de chauffe

Nous retrouvons dans les tableaux 40 et 41 le dimensionnement de base nécessaire à contrer les déperditions par transmission et par ventilation respectivement pour les 7 niveaux d'isolation et pour les 6 niveaux d'infiltration. Le tableau 42 contient les surpuissances à appliquer pour les différentes pièces en fonction du delta de température obtenu lors du ralenti du chauffage. Enfin les tableaux 43 et 44 contiennent le dimensionnement final, comprenant le dimensionnement de base et la surpuissance appliquée.

Dimensionnement de base [W]							
	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	6 cm + TV(*)	8cm + TV(*)
Cuisine	926	454	313	249	215	202	173
Buanderie	929	458	316	251	216	204	175
Cage d'escalier	1106	562	369	275	224	258	216
Chambre 1	987	594	436	354	307	303	264
Chambre 2	1480	908	646	509	434	449	390
Salle de bain	711	437	328	272	239	225	198
Salon	1562	782	531	416	357	341	293
Total	7701	4195	2939	2326	1992	1982	1709

Tableau 40 Dimensionnement de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour 7 niveaux d'isolation différents. Température de consigne de 21°C. (*) TV = Triple vitrage.

Dimensionnement de base [W]							
	0.6 h ⁻¹	0.5 h ⁻¹	0.3 h ⁻¹	0.2 h ⁻¹	0.16 h ⁻¹	0.15 h ⁻¹	
Cuisine	331	311	266	249	242	241	241
Buanderie	338	317	269	251	243	241	241
Cage d'escalier	395	362	305	275	263	261	261
Chambre 1	455	428	380	354	344	341	341
Chambre 2	714	658	562	509	488	482	482
Salle de bain	342	324	289	272	265	263	263
Salon	583	541	453	416	401	397	397
Total	3158	2941	2524	2324	2246	2226	2226

Tableau 41 Dimensionnement de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour un niveau d'isolation de 6 cm avec double vitrage pour 6 taux d'infiltration différents. Température de consigne de 21°C.

Surpuissance à ajouter pour la relance selon la norme EN 12831 [W]			
	3K	2K	1K
Cuisine	143	72	39
Buanderie	143	72	39
Cage d'escalier	90	45	25
Chambre 1	171	85	47
Chambre 2	289	145	79
Salle de bain	116	58	32
Salon	291	145	79
Total	1244	622	339

Tableau 42. Surpuissance nécessaire à la relance sur base des facteurs de relance de la source [86]. Puissance tenant compte de la surface des pièces et calculée pour une relance en 2 heures maximum, avec 1,2 ou 3 K de chute de température lors du ralenti.

Dimensionnement total [W]							
	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	6 cm + TV(*)	8cm + TV(*)
Delta T° considéré pour le surdimensionnement	3K	3K	2K	2K	1K	1K	1K
Cuisine	1069	597	385	321	254	241	212
Buanderie	1072	601	388	323	255	243	214
Cage d'escalier	1196	652	414	320	249	283	241
Chambre 1	1158	765	521	439	354	350	311
Chambre 2	1769	1197	791	654	513	528	469
Salle de bain	827	553	386	330	271	257	230
Salon	1853	1073	676	561	436	420	372
Total	8945	5439	3561	2948	2331	2321	2048
% de surdimensionnement	16%	30%	21%	27%	17%	17%	20%

Tableau 43 Dimensionnement total de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour 7 niveaux d'isolation différents. Température de consigne de 21°C. (*) TV = Triple vitrage.

Dimensionnement total [W]						
	0.6 h ⁻¹	0.5 h ⁻¹	0.3 h ⁻¹	0.2 h ⁻¹	0.16 h ⁻¹	0.15 h ⁻¹
Delta T° pour le surdimensionnement	2K	2K	2K	2K	2K	2K
Cuisine	403	383	338	321	314	313
Buanderie	410	389	341	323	315	313
Cage d'escalier	440	407	350	320	308	306
Chambre 1	540	513	465	439	429	426
Chambre 2	859	803	707	654	633	627
Salle de bain	400	382	347	330	323	321
Salon	728	686	598	561	546	542
Total	3780	3563	3146	2948	2868	2848
% de surdimensionnement	20%	21%	25%	27%	28%	28%

Tableau 44 Dimensionnement total de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour un niveau d'isolation de 6 cm avec double vitrage pour 6 taux d'infiltration différents. Température de consigne de 21°C.

ANNEXE C: Dimensionnement des débits de ventilation et du dimensionnement de la puissance de chauffe associée

Nous retrouvons dans cette annexe les différents débits qui ont été calculés pour la ventilation de notre modèle (voir tableau 46) ainsi que les valeurs de référence de la norme D50-001 (voir tableau 45). Dans les figures 55 et 56 nous retrouvons les débits de circulation d'air qui ont été mis en place entre les différentes pièces du modèle. Enfin les tableaux 47 à 49 détaillent le dimensionnement de la puissance de chauffe pour les différents cas de ventilation.

	AMENÉE D'AIR NEUF	EVACUATION D'AIR VICIÉ
Règle générale	3,6 m ³ /h par m ² de surface au sol	
AVEC POUR LIMITES PARTICULIÈRES :		
Living	min. 75 m ³ /h, max. 150 m ³ /h	
Chambres, locaux d'études et de jeux	min. 25 m ³ /h max. 36 m ³ /h par pers	
Cuisines fermées, S.D.B, buanderies		min. 50 m ³ /h, max. 75 m ³ /h
Cuisines ouvertes		min. 75 m ³ /h
W.-C.		25 m ³ /h

Tableau 45 Extrait de la norme D50-001 et les débits nominaux aux diverses pièces dans le résidentiel [80].

Débits de ventilation selon la norme D50-001					
	Surface [m ²]	Débits [m ³ /h]	Type	Débit équilibré [m ³ /h]	Débit équilibré [kg/h]
Cuisine	6.0	50	Extraction	50	60.0
Buanderie	6.0	50	Extraction	50	60.0
Cage d'escalier	4.0	0	-	0	0.0
Chambre 1	7.8	28	Pulsion	31	37.2
Chambre 2	12.4	44	Pulsion	44	52.8
Salle de bain	5.1	50	Extraction	50	60.0
Salon	12.5	75	Pulsion	75	90.0

Tableau 46 Calcul des débits de ventilation selon la norme D50-001. Débits équilibrés entre la pulsion et l'extraction.

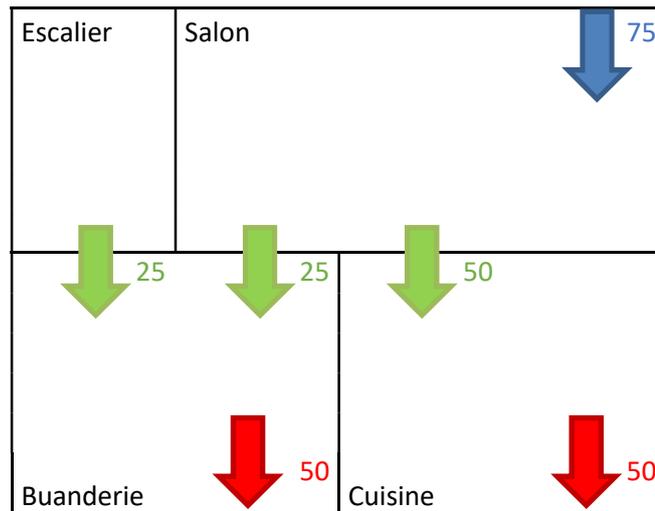


Figure 55 Circulation d'air entre les pièces ([m³/h]) au rez-de-chaussée. Flèches bleues pour l'air pulsé, flèches rouges pour l'air extrait, flèches vertes pour une circulation entre 2 pièces.

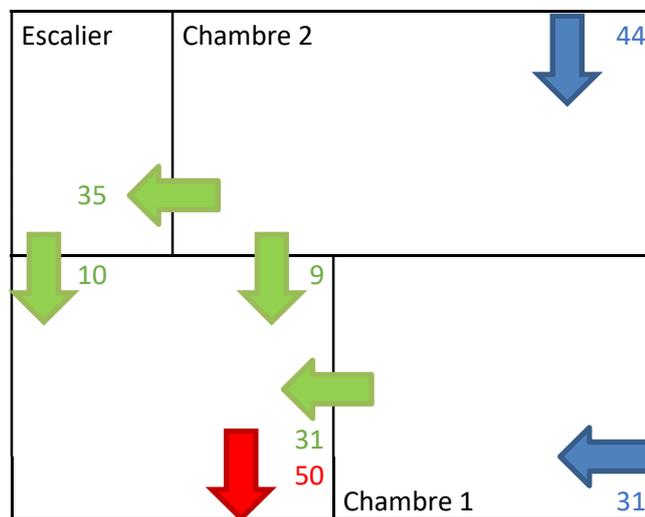


Figure 56 Circulation d'air entre les pièces ([m³/h]) au rez-de-chaussée. Flèches bleues pour l'air pulsé, flèches rouges pour l'air extrait, flèches vertes pour une circulation entre 2 pièces.

Dimensionnement de base [W]			
	NoV	V_NoHR	V_HR60%
Cuisine	249	240	248
Buanderie	251	249	253
Cage d'escalier	275	232	251
Chambre 1	354	709	491
Chambre 2	509	995	692
Salle de bain	272	257	264
Salon	416	1308	773
Total	2326	3990	2972

Tableau 47 Dimensionnement de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour les différents types de ventilation. Température de consigne de 21°C.

Surpuissance à ajouter pour la relance selon la norme EN 12831 [W]			
	3K	2K	1K
Cuisine	143	72	39
Buanderie	143	72	39
Cage d'escalier	90	45	25
Chambre 1	171	85	47
Chambre 2	289	145	79
Salle de bain	116	58	32
Salon	291	145	79
Total	1243	622	339

Tableau 48 Surpuissance nécessaire à la relance sur base des facteurs de relance de la source [71]. Puissance tenant compte de la surface des pièces et calculée pour une relance en 2 heures maximum, avec 1,2 ou 3 K de chute de température lors du ralenti.

Dimensionnement total [W]			
	NoV	V_NoHR	V_HR60%
Delta T° pour le surdimensionnement	2K	3K	3K
Cuisine	321	383	391
Buanderie	323	392	396
Cage d'escalier	320	322	341
Chambre 1	439	880	662
Chambre 2	654	1284	981
Salle de bain	330	373	380
Salon	561	1599	1064
Total	2948	5233	4215
% de surdimensionnement	27%	31%	41%

Tableau 49 Dimensionnement total de la production de chaleur pour les différentes pièces et pour les différents types de ventilation. Température de consigne de 21°C.

ANNEXE D: Script VBA d'automatisation des analyses paramétriques

Vu le nombre de variantes des simulations à réaliser, un script a été implémenté afin d'automatiser ces dernières. Ce script VBA, à lancer dans un fichier excel, permet de remplacer automatiquement certaines valeurs dans les fichiers d'input TRNSYS (*.DCK) et TRNBuild (*.B17) (p.ex. une température de consigne ou un niveau d'isolation). Les valeurs à remplacer dans ces 2 fichiers sont gardées dans 2 *sheets* excel séparées que le script va parcourir (une ligne correspond à un test à effectuer, une colonne correspond à un paramètre à remplacer). Une fois les valeurs insérées dans les fichiers TRNSYS, le script lance automatiquement TRNSYS en ligne de commande et relance ce processus tant qu'il y a de tests (des lignes dans les 2 *sheets* mentionnées) à effectuer. Une fois les différents tests lancés, le script importe les résultats dans le fichier excel qui a lancé les simulations. Nous retrouvons l'ensemble du code de ce script dans l'encadré ci-dessous.

```
Public Const filePrefix = "m1_intermittent_auto"
Public Const dckTemplate = "m1-intermittent_relance_auto.dck"
Public Const b17Template = "m1-intermittent_relance_auto.b17"

Sub LaunchParametricRun()
    Rem create all the parametrec files
    Dim numRows As Integer

    Rem prepare preliminary work
    ChDir (ActiveWorkbook.Path)
    updateRun

    Rem process template file and make new dck /b17 files
    TextFromTemplate "dck", dckTemplate, numRows
    TextFromTemplate "b17", b17Template, numRows

    Rem launch
    For i = 1 To numRows
        LaunchTrnsys ActiveWorkbook.Path + "\work\" + filePrefix + CStr(i)
    + ".dck"
    Next i

    Rem import
    ProcessData
End Sub

Rem replace placeholders
Private Sub TextFromTemplate(fileType As String, templateFile As String, numRows As Integer)

    Dim objFSO
    Set objFSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
    Dim objTemplateTS
    Const ForReading = 1
```

```

    Set objTemplateTS = objFSO.OpenTextFile(ActiveWorkbook.Path + "\" + tem
plateFile, ForReading, False)
    Dim strAllTemplateText, strAllTemplateTextCopy
    Dim rowNum

    strAllTemplateText = objTemplateTS.ReadAll()
    strAllTemplateTextCopy = strAllTemplateText

    objTemplateTS.Close

    Set placeholders = ThisWorkbook.Worksheets(fileType)

    Rem check out every line
    numRows = placeholders.Cells(1, 1).CurrentRegion.Rows.Count - 1
    For Each Row In placeholders.Cells(1, 1).CurrentRegion.Rows

        Rem Do not process first line ==> name of placeholders
        If Row.Row <> 1 Then

            rowNum = Row.Row

            For Each col In placeholders.Cells(1, 1).CurrentRegion.Columns
                placeholderCell = placeholders.Cells(1, col.Column)
                valueCell = placeholders.Cells(Row.Row, col.Column)
                strAllTemplateText = Replace(strAllTemplateText, placeHolde
rCell, valueCell)
            Next

            Rem special process for DCK file (put dynamically new output file names)
            If fileType = "dck" Then
                placeholderCell = "%build_file%"
                valueCell = filePrefix + CStr(rowNum - 1) + ".b17"
                strAllTemplateText = Replace(strAllTemplateText, placeHolde
rCell, valueCell)
            End If

            Dim objOutputTS
            Const ForWriting = 2
            fileName = filePrefix + CStr(rowNum - 1) + "." + fileType
            Set objOutputTS = objFSO.OpenTextFile(ActiveWorkbook.Path + "\w
ork\" + fileName, ForWriting, True)
            objOutputTS.Write (strAllTemplateText)

            objOutputTS.Close

            Rem reinit
            strAllTemplateText = strAllTemplateTextCopy
        End If

    Next

End Sub

```

Rem Launch simulation with trnsys

```
Private Sub LaunchTrnsys(deckFileName As String)

    Path = "C:\Trnsys17\Exe\TrnExe.exe"
    File = deckFileName

    Dim wsh As Object
    Set wsh = VBA.CreateObject("WScript.Shell")
    Dim waitOnReturn As Boolean: waitOnReturn = True
    Dim windowStyle As Integer: windowStyle = 1
    Dim errorCode As Long

    errorCode = wsh.Run(Path + " " + File + " /n", windowStyle, waitOnReturn)

    If errorCode = 0 Then
        Rem Done...
    Else
        MsgBox "Program exited with error code " & errorCode & "."
    End If

End Sub

Private Sub updateRun()
    Set paramSheet = ThisWorkbook.Worksheets("param")
    runNumber = paramSheet.Cells(1, 2)
    runNumber = runNumber + 1
    paramSheet.Cells(1, 2).Value = runNumber
End Sub

Private Sub ProcessData()

    Set fileNames = ThisWorkbook.Worksheets("dck")

    Rem Check out filenames in dck sheet and import them
    numRows = fileNames.Cells(1, 1).CurrentRegion.Rows.Count - 1

    For Each Row In fileNames.Cells(1, 1).CurrentRegion.Rows
        If Row.Row <> 1 Then

            Dim fileName As String

            fileName = fileNames.Cells(Row.Row, 1)
            importCSV fileName

            fileName = fileNames.Cells(Row.Row, 2)
            importCSV fileName
        End If
    Next

End Sub
```

```

End Sub

Sub importCSV(fileName As String)

newFileName = "TEXT;" & ActiveWorkbook.Path + "\work\" + fileName

    Sheets.Add After:=ActiveSheet
With ActiveSheet.QueryTables.Add(Connection:= _
    newFileName _
    , Destination:=Range("$A$1"))
    .Name = newFileName
    .FieldNames = True
    .RowNumbers = False
    .FillAdjacentFormulas = False
    .PreserveFormatting = True
    .RefreshOnFileOpen = False
    .RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
    .SavePassword = False
    .SaveData = True
    .AdjustColumnWidth = True
    .RefreshPeriod = 0
    .TextFilePromptOnRefresh = False
    .TextFilePlatform = 850
    .TextFileStartRow = 1
    .TextFileParseType = xlDelimited
    .TextFileTextQualifier = xlTextQualifierDoubleQuote
    .TextFileConsecutiveDelimiter = False
    .TextFileTabDelimiter = True
    .TextFileSemicolonDelimiter = False
    .TextFileCommaDelimiter = False
    .TextFileSpaceDelimiter = False
    .TextFileColumnDataTypes = Array(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)
    .TextFileTrailingMinusNumbers = True
    .Refresh BackgroundQuery:=False
End With

    Dim lastRow As Integer
lastRow = ActiveSheet.Range("A1").CurrentRegion.Rows.Count

Range("A1:H" & lastRow).Select
Range("A2").Activate
Selection.NumberFormat = "General"
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-3

Rem insert automatically date / hours
Columns("B:B").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight, CopyOrigin:=xlFormatFromLeftOrAbove
Range("B1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Date"
Columns("B:B").Select

```

```

Selection.NumberFormat = "d/m/yy;@"
Range("B2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "1/1/2016"
Range("B3").Select
ActiveCell.Formula = "=R2C +RC[-1] /24"

Range("B3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("B3:B" & lastRow)
Range("B3:B" & lastRow).Select

Columns("C:C").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight, CopyOrigin:=xlFormatFromLeftOrAbove
Range("C1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "heure"
Columns("C:C").Select
Selection.NumberFormat = "hh:mm;@"
Range("C2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "1/1/2016"
Range("C3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R2C +RC[-2] /24"
Range("C3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("C3:C" & lastRow)
Range("C3:C" & lastRow).Select

ActiveSheet.Name = Mid(fileName, 1, InStr(1, fileName, ".") - 1)

Columns("D:D").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight, CopyOrigin:=xlFormatFromLeftOrAbove
Range("D1").Select
ActiveCell.Value = "launch_ID"
Range("D2").Select

ActiveCell.Value = Mid(fileName, 1, InStr(1, fileName, ".") - 1)

Columns("D:D").Select
Range("D2").Select

Selection.AutoFill Destination:=Range("D2:D" & lastRow)
Range("D2:D" & lastRow).Select

Dim lastCol As Integer
lastCol = ActiveSheet.Cells(1, Columns.Count).End(xlToLeft).Column
ActiveSheet.Range("A1").Value = "Step"

'Remove white chars after titles
For i = 1 To lastCol
    ActiveSheet.Cells(1, i).Select
    ActiveCell.Value = LTrim(RTrim(Trim(ActiveCell.Value)))
    Dim retest As String

    retest = ActiveCell.Value
    retest = retest & "|"

```

```
Next i
```

```
End Sub
```

ANNEXE E: Liste des scénarios testés en essai-erreur non retenus

Le tableau 50 reprend les différents tests qui ont été effectués par essai-erreur mais qui n'ont pas été retenus pour l'étude.

Scénario	Coupure	Gains	Préchauffe	Particularité
1	Uniquement le 15 janvier de 18 à 0h	100% des gains et de l'occupation	Non	
2	Uniquement le 29 janvier de 18 à 0h	100% des gains et de l'occupation	Non	
3	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	100% des gains et de l'occupation	Non	
4	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	Pas de gains ni d'occupation	Non	
5	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	0% de gains, 50% d'occupation	Non	
6	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	100% gains, 50% d'occupation	Non	
7	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	100% gains, 50% d'occupation	Préchauffe de 3h à 22°C	
8	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	0% gains, 100% d'occupation	Non	
9	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	100 % gains, 50% d'occupation	Préchauffe de 3h à 22°C	
10	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	0% des gains, 100 % d'occupation	Préchauffe de 3h à 22°C	
11	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	100% des gains et de l'occupation	Non	Température de consigne 20°C
12	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	100% des gains et de l'occupation	Préchauffe de 3h à 22°C	Température de consigne 20°C
13	Coupure de 3 heures entre 18h et 20h	100% des gains et 100% de l'occupation	Préchauffe de 3h à 22°C	
14	Coupure de 3 heures entre 18h et 21h	100% des gains et 100% de l'occupation	Non	Différents niveaux d'infiltration pour un cas d'isolation de 6 cm
15	Coupure de 2 heures entre 18 et 20h	100% des gains et 100% de l'occupation	Non	
16	Coupure de 2 heures entre 18 et 20h	100% des gains et 100% de l'occupation	Préchauffe de 2h à 22°C	Préchauffe de 2 heures à 22°C
17	Coupure de 1 heure entre 18h et 19h	100% des gains et 100% de l'occupation	Non	
18	Coupure de 1 heure entre 18h et 19h	100% des gains et 100% de l'occupation	Préchauffe de 1h à 22°C	
19	Coupure de 1 heure entre 18h et 20h	100% des gains et 100% de l'occupation	Non	30 min de coupure au début et en fin de période mentionnée
20	Coupure de 1 heure entre 18h et 20h	100% des gains et 100% de l'occupation	Préchauffe de 1 h à 22°C	30 min de coupure au début et en fin de période mentionnée

Tableau 50 Liste des scénarios testés non retenus