



HAL
open science

Étude des matériaux à changement de phase (MCP) dans la réhabilitation de bâtiments. Analyse de l'impact sur le confort estival et sur les consommations énergétiques des solutions intégrant les MCP

Lysandre Delmas

► To cite this version:

Lysandre Delmas. Étude des matériaux à changement de phase (MCP) dans la réhabilitation de bâtiments. Analyse de l'impact sur le confort estival et sur les consommations énergétiques des solutions intégrant les MCP. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04442328

HAL Id: dumas-04442328

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04442328v1>

Submitted on 6 Feb 2024

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

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

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2022-2023

Voie d'approfondissement :
Bâtiment

Soutenu le 20 septembre 2023

Devant le jury composé de :

- **Président du Jury : Myriam BHRAR**
- **Maître de TFE : Pablo GARCÍA BERNÁRDEZ**
- **Expert : Mohamed EL MANKIBI**

Par

Lysandre DELMAS

Etude des Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans la réhabilitation de bâtiments

*Analyse de l'impact sur le confort estival et sur les consommations énergétiques des
solutions intégrant les MCP*

**Organisme d'accueil
ALTEREA**



Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Delmas		
Prénom	Lysandre		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	ALTEREA 19 Rue de la Villette, 69003 Lyon		
Nom du Tuteur	Pablo García Bernárdez		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Etude des Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans la réhabilitation de bâtiments : analyse de l'impact sur le confort estival et sur les consommations énergétiques des solutions intégrant les MCP		
Titre (anglais)	Study of Phase Change Materials (PCM) in the rehabilitation of buildings: analysis of the impact on summer comfort and on energy consumption of solutions integrating PCM		
Résumé (français)	<p>Les conséquences du réchauffement climatique ainsi que les objectifs réglementaires, tels que le décret tertiaire, poussent progressivement les maîtres d'ouvrages à engager des rénovations dans le but d'améliorer le confort de leurs usagers et de diminuer les consommations énergétiques des bâtiments. Dans le cadre de ces rénovations, nous proposons dans ce rapport une étude sur les Matériaux à Changement de Phase (MCP) en étudiant leur impact sur le confort estival et sur les consommations énergétiques. Sur un cas concret mêlant plusieurs usages, une simulation thermique dynamique sur Pleiades+Comfie est menée afin d'identifier les paramètres clés de ces matériaux et leurs impacts. Il en ressort notamment que ces matériaux s'avèrent particulièrement efficaces sur le confort d'été lorsqu'ils sont couplés à d'autres interventions : aération nocturne, dispositifs d'occultation etc. Ils permettent une baisse des consommations énergétiques limitée, variant suivant l'état des lieux initial du bâtiment de référence. D'une manière générale, l'emploi de ces matériaux nécessite des études préalables pour assurer leur pertinence et leur efficacité, en particulier pour le choix de la température de fusion.</p>		
Résumé (anglais)	<p>The consequences of global warming as well as regulatory objectives, such as the tertiary decree, are gradually pushing project owners to undertake renovations with the aim of improving the comfort of their users and reducing the energy consumption of buildings. As part of these renovations, we propose in this report a study on Phase Change Materials (PCM) by studying their impact on summer comfort and energy consumption. On a concrete case combining several uses, a dynamic thermal simulation on Pleiades+Comfie is carried out in order to identify the key parameters of these materials and their impacts. It shows particularly that these materials prove to be particularly effective on summer comfort when they are coupled with other interventions: nocturnal ventilation, concealment devices, etc. They allow a limited reduction in energy consumption, varying according to the initial inventory of the reference building. In general, the use of these materials requires preliminary studies to ensure their relevance and their effectiveness, in particular for the choice of the melting temperature.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Energétique – Matériaux à Changement de Phase – Confort d'été – Stockage de la chaleur – Simulation Thermique Dynamique		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Energy – Phase Change Materials – Summer Comfort – Heat Storage – Dynamic Thermal Simulation		
Termes géo-graphique (français)	France – Lyon - Dijon – Ecole Nationale des Greffes		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	99	13	47

Déclaration de travail personnel

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

Sommaire

Notice analytique	2
Déclaration de travail personnel	3
Sommaire	4
Liste des illustrations	7
Liste des tableaux	9
Remerciements.....	10
Introduction	11
1 Contexte de l'étude.....	13
1.1 Le contexte climatique global en France et dans le monde.....	13
1.2 Le poids du secteur du bâtiment en France.....	15
1.3 Réglementations et objectifs de diminution de la consommation d'énergie : le cas des bâtiments tertiaires.....	18
1.4 Les enjeux de qualité d'environnement intérieur pour les occupants	20
1.4.1 Les paramètres de la qualité d'environnement intérieur.....	20
1.4.2 La notion de confort thermique et ses composantes	21
1.4.3 Focus sur la surchauffe en été et la notion d'îlots de chaleur urbain	24
1.4.3.1 Quelques causes des surchauffes en été	24
1.4.3.2 Les îlots de chaleur urbains (ICU)	25
1.5 La méthodologie typique mise en place pour répondre à ces enjeux actuels : l'audit énergétique associé à une étude de confort thermique.....	26
1.5.1 Le déroulé d'une démarche classique.....	26
1.5.2 Présentation spécifique du logiciel de STD utilisé dans l'étude.....	28
2 Etat de l'art sur les MCP	29
2.1 Les méthodes de stockage de l'énergie thermique.....	29
2.2 La théorie du changement de phase : chaleur sensible et latente.....	32
2.2.1 Le diagramme de changement de phase	32
2.2.2 Changement de phase dans le cas d'un corps pur idéal et réel.....	33
2.2.3 Les phénomènes relatifs à l'emploi des MCP	34
2.3 Définition des matériaux à changement de phase.....	35
2.3.1 Principes.....	35
2.3.2 Inertie thermique et MCP.....	35
2.4 Les matériaux utilisables pour le stockage de chaleur latente	36
2.4.1 Les organiques.....	37
2.4.2 Les inorganiques	38
2.4.3 Les eutectiques.....	39
2.4.4 Conditionnement et coûts des MCP	39
2.5 Intégration des MCP dans le bâtiment	41
2.5.1 Intégration passive.....	41

2.5.2	Intégration active.....	43
2.5.3	Présentation de quelques matériaux commercialisés	44
3	Etude de l'influence des MCP sur le confort estival et les consommations énergétiques : applications sur un cas d'étude.....	47
3.1	Contexte de la mission alimentant notre cas d'étude.....	47
3.2	Présentation du cas d'étude dans sa globalité	47
3.2.1	Présentation générale.....	47
3.2.2	Présentation succincte des bâtiments composant le site	48
3.2.3	Les consommations énergétiques du site	49
3.2.4	Etude des déperditions	51
3.2.5	Etude de la répartition énergétique par poste et par bâtiment	52
3.2.6	Calage du modèle sur logiciel	52
3.3	Présentation spécifique du bâtiment B.....	53
3.3.1	Etat des lieux : situation initiale modélisée	53
3.3.1.1	Bâti.....	53
3.3.1.2	Zonage thermique	54
3.3.1.3	Chauffage.....	55
3.3.1.4	Climatisation	55
3.3.1.5	Renouvellement d'air	55
3.3.1.6	Etanchéité à l'air.....	55
3.3.1.7	Occupation.....	56
3.3.1.8	Eclairage.....	56
3.3.1.9	Puissance dissipée	57
3.3.1.10	Dispositifs d'occultation.....	57
3.3.1.11	Aération.....	57
3.3.1.12	Fichier Météo	58
3.3.2	Analyse de l'état initial.....	59
3.3.2.1	Ombres portées et insolation des façades.....	59
3.3.2.2	Bilans des apports estivaux.....	59
3.3.3	Choix des indicateurs pour étudier le confort estival et visualisation des résultats	61
3.4	Etudes préliminaires sur les MCP.....	62
3.4.1	Influence de la température de fusion.....	62
3.4.2	Etude de trois produits de fabricants différents.....	64
3.4.3	Influence des parois équipées de MCP	65
3.4.4	Influence du couplage isolation (ITI/ITE) avec MCP	67
3.4.5	Conclusion des études préliminaires	68
3.5	Etude des MCP sur le cas d'étude	68
3.5.1	Impact des MCP sur l'état initial	68
3.5.2	Impact de l'ouverture des fenêtres sur le confort estival	69
3.5.3	Impact des dispositifs d'occultation sur le confort estival	70
3.5.4	1 ^{ère} combinaison : MCP avec ouverture nocturne	70

3.5.5	2 ^{ème} combinaison : MCP avec occultation	72
3.5.6	3 ^{ème} combinaison : MCP avec sur-ventilation nocturne	73
3.5.7	Scénario.....	74
3.6	Etude des MCP sur les consommations énergétiques à l'échelle du site	76
4	Discussion des résultats et limites.....	77
4.1	Impacts sur le confort d'été et les consommations énergétiques	77
4.2	Limites et perspectives.....	78
	Conclusion.....	81
	Bibliographie	83
	Liste des abréviations.....	86
	Annexes.....	87
	Annexe 1.....	87
	Annexe 2.....	87
	Annexe 3.....	88
	Annexe 4.....	89
	Annexe 5.....	91
	Annexe 6.....	94
	Annexe 7.....	98

Liste des illustrations

Figure 1 : Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2020 (3)	13
Figure 2 : Evolutions des températures suivant les scénarios du GIEC (3)	14
Figure 3 : Écart à la normale (période 1961-1990) des températures moyennes annuelles en France métropolitaine (3).....	14
Figure 4 : Les différents impacts du changement climatique en France (5).....	15
Figure 5 : Répartitions des émissions de GES du résidentiel, par poste, en 2019 (8)	16
Figure 6 : Consommations finales énergétiques par secteur, corrigées des variations climatiques, en France (2)	16
Figure 7 : Répartition de la consommation finale d'énergie du secteur tertiaire par usage (9)	17
Figure 8 : Pourcentages des surfaces climatisées dans les différents secteurs tertiaires (12)	17
Figure 9 : Répartition des consommations énergétiques liées à la climatisation en fonction des différents secteurs tertiaires (12).....	18
Figure 10 : Types de bâtiments concernés par le décret tertiaire (13)	19
Figure 11 : Objectifs en valeur relative du décret tertiaire (14)	19
Figure 12 : La démarche négaWatt (15).....	20
Figure 13 : Les paramètres du confort thermique et leurs interdépendances (18).....	21
Figure 14 : Echelle de notation du modèle de Fanger.....	22
Figure 15 : Graphique de la température intérieure de confort en fonction de la température extérieure moyenne mensuelle et du type de bâtiment (19).....	23
Figure 16 : Diagramme de Givoni (19)	23
Figure 17 : Les effets cumulatifs responsables d'une surchauffe dans le bâtiment (21).....	24
Figure 18 : Le phénomène d'ilots de chaleur (22)	25
Figure 19 : Démarche de la Simulation Thermique Dynamique (23)	26
Figure 20 : Exemple d'un tableau récapitulatif des interventions proposées pour un établissement scolaire (24)	27
Figure 21 : Les différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique	29
Figure 22 : Graphique présentant l'enthalpie d'un corps en fonction de la température lors d'une transition solide/liquide (27).....	30
Figure 23 : Classification des matériaux en fonction de leur diffusivité et effusivité (19).....	32
Figure 24 : Schéma des changements d'état (28).....	33
Figure 25 : Transformation représentée dans le diagramme des phases	33
Figure 26 : Illustrations de l'évolution de la température d'un corps pur (gauche) et d'un corps réel (droite) lors d'une solidification (29)	34
Figure 27 : Illustration du phénomène de surfusion (29).....	34
Figure 28 : Illustration du phénomène d'inertie thermique (30).....	35
Figure 29 : Classification des substances pour le stockage d'énergie (31)	36
Figure 30 : Classification des principaux types de matériaux à changement de phase (27).....	37
Figure 31 : Quelques exemples de conditionnement par macro-encapsulation (32)	40
Figure 32 : Exemples de micro-encapsulation de la marque Rubitherm (29).....	40
Figure 33 : Stores équipés de MCP (34)	42
Figure 34 : Schéma de principe de fonctionnement du vitrage GlassX, rayons solaires estivaux (gauche) et hivernaux (droite) (36).....	42
Figure 35 : Schéma de principe du fonctionnement de l'échangeur la nuit (b) et en journée (a) (37)	43
Figure 36 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à stratification (38)	43
Figure 37 : Illustration et caractéristiques thermiques du produit MICRONAL [®] PCM (39)	44
Figure 38 : Propriétés de la gamme de produits Inertek (43).....	45
Figure 39 : Vue transversale d'un panneau Energain (44).....	46
Figure 40 : Photographie 3D (46) et plan de masse du site.....	48
Figure 41 : Evolution des consommations en électricité à l'échelle du site	49
Figure 42 : Evolution des consommations en RCU à l'échelle du site.....	50
Figure 43 : Evolution mensuelle de la consommation de chaleur à l'échelle du site.....	50
Figure 44 : Vue 3D de la modélisation du site sur le logiciel Pleiades+Comfie	51
Figure 45 : Déperditions à l'échelle du site	51

Figure 46 : Diagramme des consommations par poste (kWh EF/PCI).....	52
Figure 47 : Graphique représentant la consommation surfacique par bâtiment	52
Figure 48 : Localisation des pièces étudiées dans le cadre de l'étude	54
Figure 49 : Algorithme d'ouverture issu des règles Th-BCE.....	58
Figure 50 : Courbe annuelle de la température extérieure (Dijon - RCP4.5 2070)	59
Figure 51 : Bilans des apports estivaux pour chaque pièce étudiée	60
Figure 52 : Evolutions de la température pour le dortoir sur la semaine la plus chaude.....	63
Figure 53 : Résultats du calcul aéraulique et de la température, dans la crèche, à 14h	66
Figure 54 : Evolutions de la température sur la semaine la plus chaude pour le dortoir.....	66
Figure 55 : Evolutions de la température sur la semaine la plus chaude, pour le logement (EI = Etat Initial ; VAR1 = Pas d'ouverture)	69
Figure 56 : Evolutions de la température sur la semaine la plus chaude, pour le logement (EI = Etat Initial ; VAR2 = Pas d'occultation).....	70
Figure 57 : Diagramme présentant les résultats de l'aération nocturne sans MCP (gauche) et avec MCP (droite) pour le logement	71
Figure 58 : Diagramme présentant les résultats de l'occultation sans MCP (gauche) et avec MCP (droite) pour le dortoir	73
Figure 59 : Diagramme présentant les résultats du scénario sans MCP (gauche) et avec MCP (droite)	75
Figure 60 : Exemples de données environnementales et économiques pour le BioPCM M182/Q27 de la bibliothèque DesignBuilder	78
Figure 61 : Evolution de l'enthalpie en fonction de la température pour le BioPCM M182/Q27	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux de construction, solide et liquide (27)	31
Tableau 2 : Caractéristiques thermiques des paraffines linéaires (27)	38
Tableau 3 : Caractéristiques thermiques de non-paraffines (27)	38
Tableau 4 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux à changement de phase inorganiques (27,32)	38
Tableau 5 : Caractéristiques thermiques de quelques eutectiques (27,32)	39
Tableau 6 : Coûts de quelques MCP bruts et commercialisés (33)	41
Tableau 7 : Principales caractéristiques de chaque bâtiment	49
Tableau 8 : Ecart entre les consommations réelles et modélisées (théoriques)	53
Tableau 9 : Caractéristiques du bâti	54
Tableau 10 : Programme horaire des systèmes de chauffage pour les pièces étudiées	55
Tableau 11 : Caractéristiques du renouvellement d'air mécanique	55
Tableau 12 : Caractéristiques de l'occupation	56
Tableau 13 : Caractéristiques concernant l'éclairage	56
Tableau 14 : Caractéristiques des équipements	57
Tableau 15 : Caractéristiques des dispositifs d'occultation	57
Tableau 16 : Caractéristiques des ouvertures des menuiseries	58
Tableau 17 : Résultats de l'Etat Initial	61
Tableau 18 : Résultats avec deux matériaux ayant une température de fusion différente (23°C et 28°C)	62
Tableau 19 : Principales caractéristiques thermiques pour les trois matériaux testés	64
Tableau 20 : Résultats pour trois MCP différents	65
Tableau 21 : Résultats concernant l'influence des parois équipées en MCP	65
Tableau 22 : Résultats d'une ITI avec et sans MCP	67
Tableau 23 : Résultats d'une ITE avec et sans MCP	67
Tableau 24 : Résultats de l'Etat Initial avec et sans MCP	68
Tableau 25 : Résultats avec et sans ouverture pour le logement	69
Tableau 26 : Résultats avec et sans occultation pour le logement	70
Tableau 27 : Résultats de la 1ère combinaison avec et sans MCP	71
Tableau 28 : Résultats de la 2ème combinaison avec et sans MCP	72
Tableau 29 : Résultats de la 3ème combinaison avec et sans MCP	74
Tableau 30 : Résultats du scénario avec et sans MCP	75
Tableau 31 : Résultats des interventions intégrant des MCP sur les consommations énergétiques à l'échelle du site	76
Tableau 32 : Classification des solutions passives	77
Tableau 33 : Résultats des interventions, portant sur le pilotage, sur les consommations énergétiques à l'échelle du site	78

Remerciements

En premier lieu, je remercie dans un élan sincère Pablo GARCÍA BERNÁRDEZ, mon tuteur de stage, pour son accueil, sa disponibilité et pour le temps qu'il m'a consacré pendant ces cinq mois de stage. Ses utiles conseils, la sûreté de son jugement, son attention et son implication durant l'intégralité de mon stage m'ont permis une montée en compétences indéniable.

Ensuite, je souhaite remercier d'une manière globale l'ensemble des chargé.es d'études, coordinateur.trices, chef.fes de projets et directeur d'agence qui, de près ou de loin, ont participé à mon intégration et à ma montée en compétences durant ce stage. Mes remerciements plus particuliers vont à Quentin DARAKDJIAN, coordinateur métier simulations numériques, pour sa relecture du présent rapport. Mes remerciements vont également à la direction d'ALTEREA de m'avoir permis d'effectuer ce stage.

Je remercie également Myriam BHRAR, présidente de jury de mon TFE pour le temps accordé à l'évaluation de mon travail. Merci également à Mohamed EL MANKIBI d'avoir accepté d'endosser le rôle d'expert dans le cadre de ce travail de fin d'études.

Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à l'ENTPE qui m'a permis durant ma formation, riche et diversifiée, de pouvoir réaliser ce stage constituant une véritable mise en situation professionnelle sur une longue durée.

Introduction

Le Travail de Fin d'Etude (TFE) faisant l'objet de ce rapport a été réalisé au sein d'ALTEREA, bureau d'études faisant partie du groupe ALTYN. ALTEREA, spécialisée dans l'ingénierie de l'énergie, est société à mission depuis juillet 2022 et accompagne les maitres d'ouvrage pour la transition énergétique, environnementale et numérique des bâtiments et des territoires.

La synthèse du sixième rapport d'évaluation du GIEC destinée aux décideurs (1), publié en mars 2023, met en évidence les changements croissants à l'échelle mondiale en lien direct avec le réchauffement planétaire. Ce réchauffement accroît ainsi proportionnellement les risques sur les systèmes terrestres (incendies, sécheresses, inondations ou bien encore perte de biodiversité) et sur les systèmes océaniques.

L'ensemble des secteurs (transport, industrie, agriculture ou encore bâtiment) joue un rôle dans ce dérèglement climatique en participant à l'augmentation des gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment n'est pas épargné et constitue un foyer important dans l'émission de gaz à effet de serre à la fois pendant sa construction (ou rénovation) et pendant son exploitation. La production et la consommation d'énergie représente la part principale de ces émissions. Le bâtiment représente alors le secteur le plus important en termes de consommation finale énergétique avec 49% des consommations totales. La part du secteur du bâtiment dans les consommations finales augmente également suivant les années : de 43 % en 1990 à 49 % en 2020. (2)

Afin de limiter les conséquences du dérèglement climatique, le bâtiment a amorcé sa transition environnementale et énergétique. Il s'agit désormais de favoriser le développement de nouvelles techniques et outils fondés sur l'utilisation rationnelle de l'énergie, le recyclage des matériaux ou bien encore le développement des énergies renouvelables. Il s'agit également de repenser les méthodes de constructions actuelles afin de réduire les besoins de chauffage en hiver et de refroidissement en été. Outre les réglementations thermiques successives depuis le choc pétrolier de 1973, dont la dernière est la RE2020, la mise en place du décret tertiaire pousse progressivement les maitres d'ouvrages à mener des opérations de réhabilitations sur les bâtiments. Les travaux de rénovation s'amorcent ainsi progressivement et il s'agit alors de réfléchir aux solutions les plus intéressantes en prenant en compte des considérations de plusieurs natures. Les solutions doivent être pertinentes et performantes en termes d'efficacité énergétique mais aussi prendre en compte les considérations environnementales, sociales et économiques. Une attention particulière doit être menée concernant le confort estival. Les solutions envisageables peuvent ainsi concerner l'enveloppe du bâtiment (isolation, remplacement des menuiseries, ...) mais aussi porter sur les systèmes mis en place et leur régulation (production de chaleur, intégration des énergies renouvelables, régulation, ...).

Dans ce rapport, nous nous focaliserons plus précisément sur les matériaux pouvant être utilisés sur l'enveloppe dans le cadre de ces rénovations, en portant notre attention sur les matériaux à changement de phase, déjà largement concernés par des recherches scientifiques.

Ce TFE propose ainsi une étude précise sur l'usage des Matériaux à Changement de Phase (noté MCP dans la suite du rapport) dans le cadre de ces rénovations. Ce rapport se propose ainsi de répondre à la problématique suivante :

Dans un contexte de rénovation, dans quelle mesure les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent-ils être intégrés comme régulation thermique dynamique, en couplage avec des solutions de rafraîchissement passif, afin de garantir un confort estival pour les occupants et une diminution des consommations énergétiques ?

Dans une première partie, nous évoquerons plus précisément le contexte global et les enjeux auxquels doivent répondre les bâtiments. Nous détaillerons les objectifs fixés concernant la réduction des consommations énergétiques tout en évoquant la notion de qualité d'environnement intérieur avec le confort thermique et le risque de surchauffe en été. Nous évoquerons également la méthodologie classique pour accompagner les maîtres d'ouvrages dans la poursuite de ces objectifs.

Ensuite, nous réaliserons un état de l'art sur les matériaux à changement de phase. Après avoir détaillé les différents modes de stockage de l'énergie thermique, nous évoquerons les types de MCP et leur critère de sélection, ainsi que leur intégration, à la fois active et passive, dans le secteur du bâtiment. Quelques produits commercialisés seront également présentés.

Il s'agira ensuite de voir et de mesurer l'influence que peut avoir l'intégration passive de MCP dans le bâtiment pour le confort d'été en regardant également l'impact sur les consommations énergétiques du bâtiment. Pour cela, un bâtiment servira de cas d'étude. Une simulation énergétique dynamique (SED) et une étude de confort estival seront réalisées sur l'outil Pleiades+Comfie.

Finalement, une discussion des résultats, présentant également les principales limites et perspectives, précèdera la conclusion générale.

1 Contexte de l'étude

Nous proposons dans cette première partie de présenter le contexte global dans lequel s'articule notre problématique de recherche. Après un bref rappel sur le contexte climatique global et le poids du secteur du bâtiment, nous évoquerons les objectifs et enjeux à la fois sur la sobriété énergétique et environnementale, mais aussi sur la qualité d'environnement intérieur pour les occupants. La notion de confort thermique sera également largement développée et un focus sur la surchauffe d'été sera réalisé.

1.1 Le contexte climatique global en France et dans le monde

Dans ses rapports successifs, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) met en lumière les observations du changement climatique et pointe ainsi une augmentation et une accélération du réchauffement de l'air et de l'eau depuis le début des années 1980, à l'échelle mondiale. Le GIEC met ainsi en évidence un réchauffement de 1,1°C durant la période 2011-2020 au regard de la période pré-industrielle (1850-1900) constituant la période de référence des études. La limitation de ces anomalies de températures constitue et constituera ainsi dans les prochaines années un enjeu crucial. (3)

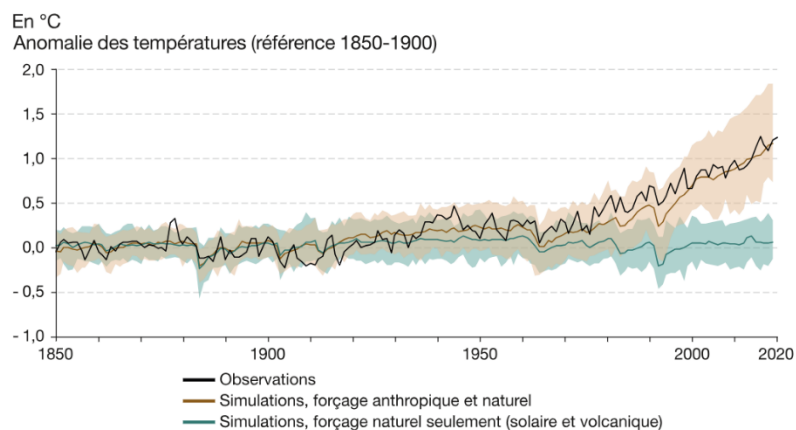


Figure 1 : Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2020 (3)

Afin d'anticiper la situation future, et à partir de ces observations et de l'utilisation de modèles climatiques, les chercheurs convertissent les émissions des gaz à effet de serre en réchauffement futur constituant ainsi les projections climatiques. Le GIEC a alors défini des scénarios SSP (*Shared Socio-Economics Pathways*) en fonction des évolutions futures de la société. Cinq scénarios principaux ont été établis, le SSP3 et SSP5 correspondent à des émissions de GES élevées et très élevées aboutissant à un réchauffement respectif de 2,1 et 2,4°C à moyen terme (2041-2060). Le scénario intermédiaire (SSP2) prévoit une augmentation de 2,0°C à moyen terme tandis que les scénarios avec des émissions de GES faibles (SSP1) prévoient une augmentation de 1,6/1,7°C à moyen terme. Le tableau et le graphique ci-dessous présentent plus précisément les évolutions de températures à court, moyen et long terme.

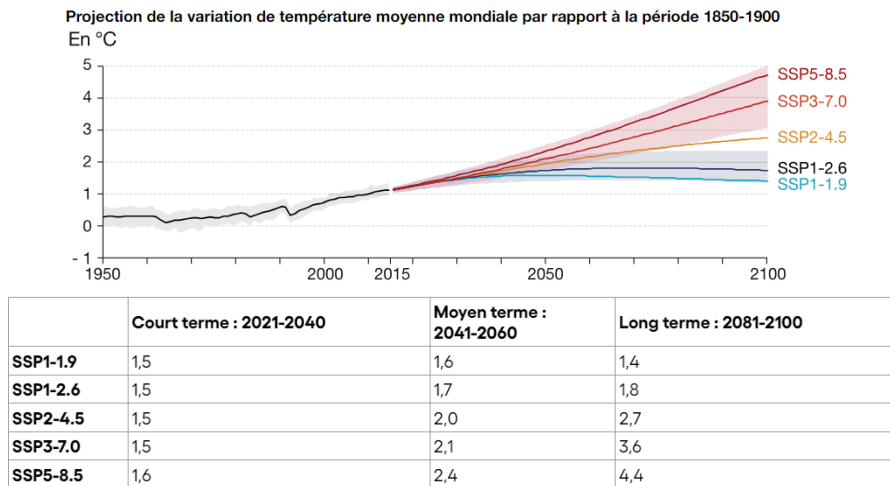


Figure 2 : Evolutions des températures suivant les scénarios du GIEC (3)

Les observations du réchauffement climatique à l'échelle du monde demeurent les mêmes à l'échelle de la France. En France, les températures moyennes ont augmenté de 1,7°C depuis 1900 avec une augmentation soutenue depuis 1990. Par rapport à l'échelle mondiale, cette augmentation apparaît plus importante en France (1,7°C contre 1,2°C à l'échelle mondiale). On constate globalement une augmentation de +0.3°C par décennie. (4)

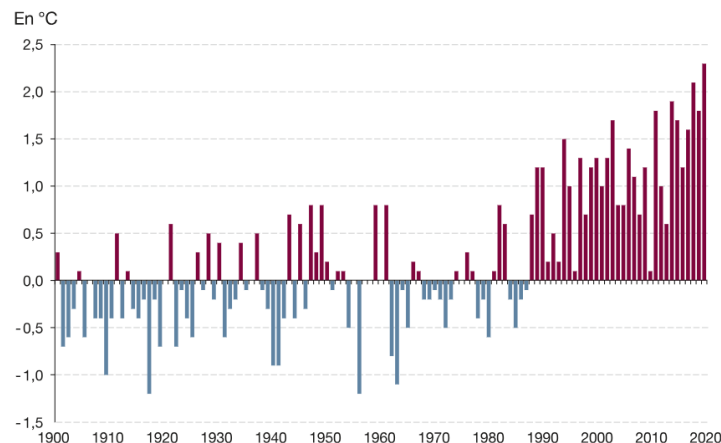


Figure 3 : Écart à la normale (période 1961-1990) des températures moyennes annuelles en France métropolitaine (3)

Des changements majeurs découlent alors des émissions de gaz à effet et donc de l'augmentation des températures. Ils impactent ainsi durablement la société et l'économie (baisse du tourisme avec la baisse de l'enneigement, faible rendement dans le domaine agricole, ...). Une augmentation des événements climatiques extrêmes (sécheresses accrues, pluies diluviennes, cyclones...) est également une conséquence de ce réchauffement global. La hausse du niveau marin engendre davantage d'inondations dans les zones côtières et certaines zones verront leur risque lié aux feux de forêt drastiquement augmenté. La carte, ci-dessous, illustre les principales conséquences qui concernera la France.



Figure 4 : Les différents impacts du changement climatique en France (5)

La situation actuelle et les différentes projections détaillées par le GIEC mettent alors en exergue la nécessité d'atténuer ces émissions de GES et d'adapter le fonctionnement des sociétés. En effet, le rythme et l'ampleur de ces conséquences sont conditionnés à l'évolution des futures émissions de GES. Ces deux leviers (atténuation et adaptation) permettraient alors de limiter les conséquences et préjudices découlant du changement climatique. Pour cela, en France, la mise en place de la SNBC (Stratégie Nationale Bas-Carbone) a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050. En parallèle de cette stratégie nationale, les collectivités territoriales tendent à instaurer des stratégies locales d'adaptation notamment dans le cadre du PCAET (Plan Climat-Air-Energie Territorial).

Ainsi, la mobilisation de l'ensemble des secteurs émetteurs de GES est nécessaire afin d'atteindre ces objectifs. Le secteur du bâtiment est largement concerné comme nous allons à présent l'évoquer.

1.2 Le poids du secteur du bâtiment en France

Le secteur du bâtiment joue un rôle important dans la stratégie d'atténuation des gaz à effet de serre en constituant un foyer important d'émissions. Il représente 23% des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la France (6). La construction du bâtiment est responsable d'environ 60% de son empreinte carbone tandis que son exploitation représente 40% de l'empreinte carbone (7). La combustion d'énergie fossile, la production d'électricité et la vie du bâtiment représentent ainsi les principales sources de ces émissions. Pendant sa période d'exploitation, les postes du secteur résidentiel qui émettent le plus de GES sont ainsi le chauffage (81%), l'eau chaude sanitaire (12%) puis la cuisson (7%). (8)

En %
Répartition des émissions du résidentiel en 2019
par poste

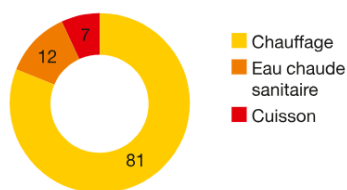
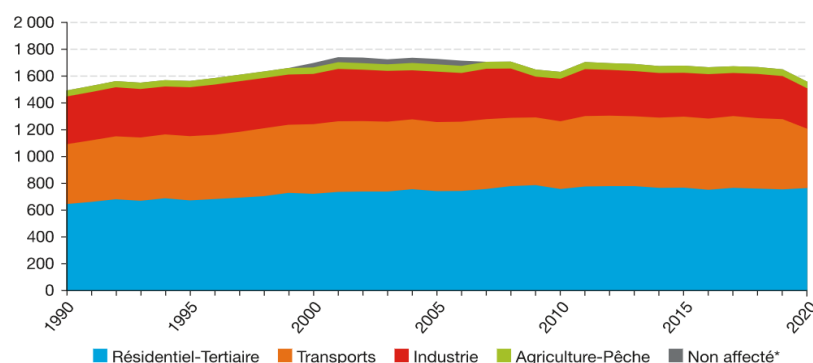


Figure 5 : Répartitions des émissions de GES du résidentiel, par poste, en 2019 (8)

Concernant la consommation finale énergétique, le secteur Résidentiel-Tertiaire représente 49% des consommations totales. La part du secteur du bâtiment dans les consommations finales augmente également suivant les années : de 43 % en 1990 à 49 % en 2020 comme l'illustre le graphique ci-dessous correspondant à la consommation énergétique finale par secteur en France. (2)

CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR

Total : 1 562 TWh en 2020 (données corrigées des variations climatiques)
En TWh (données corrigées des variations climatiques)

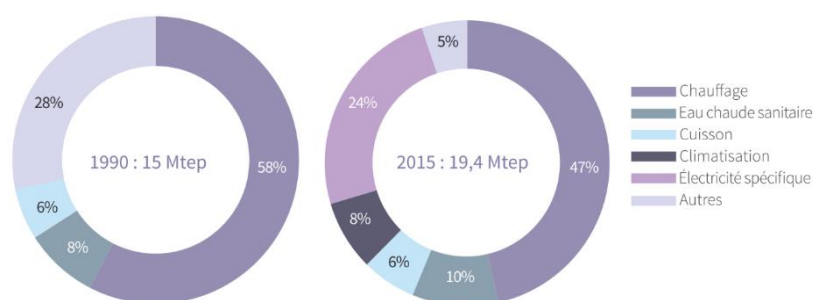


* La répartition de la chaleur par secteur consommateur n'est pas disponible entre 2000 et 2006.
Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.
Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Figure 6 : Consommations finales énergétiques par secteur, corrigées des variations climatiques, en France (2)

Plus précisément, dans le domaine du bâtiment, le secteur tertiaire est responsable de la consommation de 22,4 Mtep d'énergie finale en 2019. 60 % de cette consommation concerne les bureaux, commerces et bâtiments d'enseignement. Dans le secteur tertiaire, bien que l'on note une baisse en 2019 et une stabilisation, les consommations d'énergie entre 2000 et 2019 ont augmenté. (9)

Dans la répartition de cette consommation d'énergie, les deux postes de consommations (hors électricité spécifique) les plus importants sont le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Néanmoins, il s'agit également de considérer la hausse significative de la consommation d'énergie pour la climatisation (0% en 1990 contre 8% en 2015) et de l'électricité spécifique (24% en 2015) avec une baisse de la consommation liée au chauffage (58% en 1990 contre 47% en 2015). (9)



Source : CEREN - « Suivi du parc et des consommations d'énergie - secteur tertiaire » - avril 2017
 Champ : France métropolitaine (données corrigées du climat)

Figure 7 : Répartition de la consommation finale d'énergie du secteur tertiaire par usage (9)

Ces différents chiffres mettent ainsi en évidence la nécessité de diminuer les consommations liées au chauffage et à la climatisation. Plus précisément, la demande mondiale d'énergie provenant des climatiseurs devrait tripler d'ici 2050. Cette demande croissante nécessiterait une nouvelle capacité électrique équivalente à la capacité électrique combinée des États-Unis, de l'UE et du Japon aujourd'hui. La climatisation devient ainsi un enjeu crucial puisque l'on compte d'ores et déjà 1,6 milliard de climatiseurs aujourd'hui selon l'IEA. Selon cet organisme, le stock mondial de climatiseurs dans les bâtiments passera à 5,6 milliards d'ici 2050 ce qui représente 10 nouveaux climatiseurs vendus chaque seconde au cours des 30 prochaines années. Fatih Birol, directeur de l'IEA, évoque ainsi ses craintes concernant cette future explosion de la demande et parle déjà d'une « crise du froid » dans les prochaines années. (10,11)

En France, et plus précisément dans le secteur tertiaire, le taux d'équipement du bâtiment avec une climatisation varie fortement selon les secteurs. Seulement 7% des bâtiments destinés à l'enseignement sont équipés d'une climatisation alors que ce taux atteint 64% dans les bâtiments abritant des bureaux. La figure 8 présente les résultats pour l'ensemble des typologies de bâtiment du secteur tertiaire. (12)

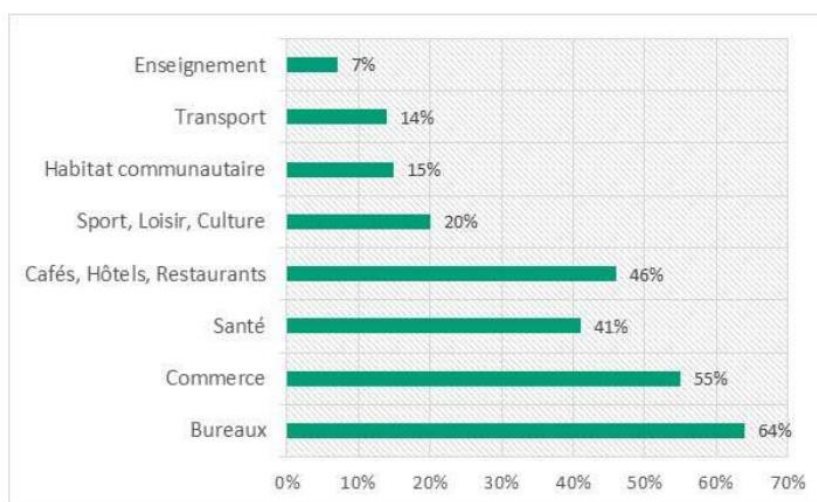


Figure 8 : Pourcentages des surfaces climatisées dans les différents secteurs tertiaires (12)

Au sein de chaque typologie d'usage, ce taux varie en fonction de la superficie du bâtiment : les grandes surfaces sont davantage équipées que les petites surfaces. Les consommations énergétiques assimilables à la climatisation, pour le secteur tertiaire, représentent 10,6 TWh en 2020. Les bâtiments de bureaux et de commerce, ayant les surfaces climatisées les plus importantes, sont conséquemment ceux qui consomment le plus.

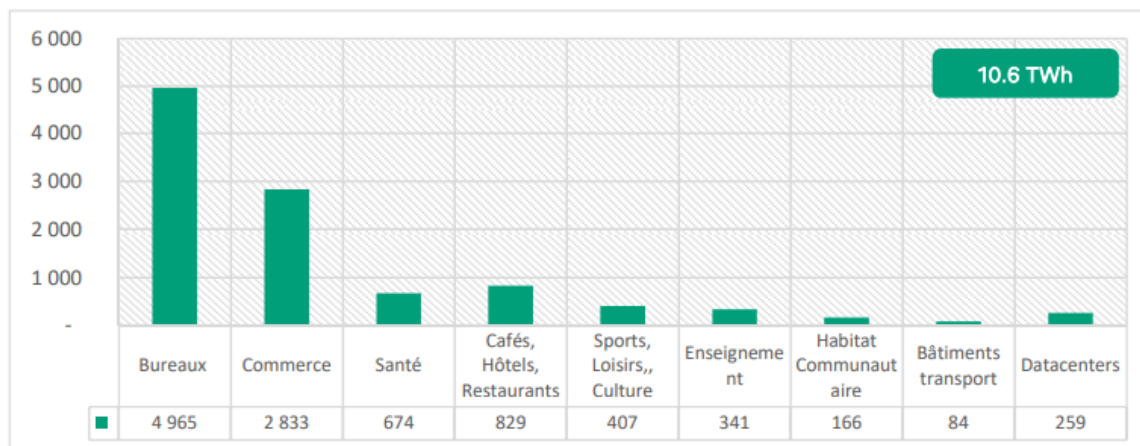


Figure 9 : Répartition des consommations énergétiques liées à la climatisation en fonction des différents secteurs tertiaires (12)

Selon l'ADEME, le fonctionnement de ces systèmes de climatisation (résidentiel et tertiaire) représente 0,9 million de tonnes de CO₂. Le secteur tertiaire représente 68% de ces émissions contre 32% pour le résidentiel (12). Le secteur du bâtiment est ainsi un secteur largement impactant dans le réchauffement climatique notamment en raison des émissions de GES liés à son importante consommation d'énergie.

1.3 Réglementations et objectifs de diminution de la consommation d'énergie : le cas des bâtiments tertiaires

Comme évoqué précédemment, le secteur du bâtiment est responsable d'une part significative des consommations d'énergie totale. Le secteur résidentiel tout comme le secteur tertiaire jouent ainsi un rôle considérable dans la préservation des ressources et dans l'objectif de sobriété énergétique. Nous allons à présent évoquer les réglementations et objectifs actuels de réduction des consommations d'énergie, en particulier pour les bâtiments tertiaires.

Tout comme les bâtiments résidentiels, les bâtiments tertiaires sont soumis à une réglementation thermique. Applicable depuis le 1^{er} janvier 2022 pour les bâtiments neufs, la Réglementation Environnementale (RE2020) remplace la Réglementation Thermique (RT2012) en allant plus loin sur certains aspects. La mise en place d'une séquence caniculaire et d'un indicateur des degrés heure d'inconfort permet une amélioration du confort d'été, particulièrement affecté par les phénomènes d'ilots de chaleur dans les villes. Une étude de la performance environnementale du bâtiment est également intégrée avec une analyse du cycle de vie du bâtiment, de sa construction jusqu'à sa démolition. Enfin, la mise en place d'indicateurs incite fortement le recours aux énergies renouvelables.

Ensuite, en plus des réglementations thermiques, depuis 2019, les bâtiments tertiaires sont directement concernés par l'engagement au sein d'une démarche de sobriété énergétique. Le décret

tertiaire, aussi appelé « Dispositif Eco-Energie Tertiaire » (DEET) est entré en vigueur en octobre 2019 et est issu de la Loi Elan (Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique), promulguée fin 2018. Ce décret vise à mobiliser l'ensemble des maîtres d'ouvrages du tertiaire afin qu'ils participent à la sobriété énergétique. Il représente ainsi de véritables opportunités pour les maîtres d'ouvrage : des économies sur les dépenses liées à l'énergie, une amélioration de la qualité de vie pour les occupants mais aussi un impact positif en faveur de la préservation de l'environnement.

Globalement, tous les bâtiments tertiaires privés et publics (enseignements, bureaux, culture, justice, commerce, ...), ayant une surface supérieure ou égale à 1000 m² sont concernés. La figure ci-dessous résume l'ensemble des bâtiments soumis à cette réglementation.



Figure 10 : Types de bâtiments concernés par le décret tertiaire (13)

Ayant pour objectif d'accélérer la diminution de la consommation du parc tertiaire français, deux objectifs alternatifs ont été mis en place avec trois échéances : 2030, 2040 et 2050. Deux types d'objectifs sont envisageables : l'objectif en valeur relative et l'objectif en valeur absolue. L'objectif en valeur relative fixe un niveau de réduction par rapport à une année de référence. En 2030, l'objectif est une diminution de -40%, puis en 2040 de -50% et en 2050 de -60%. La réduction est faite par rapport à une année de référence, comprise entre 2010 et 2019, et choisie par le maître d'ouvrage.



Figure 11 : Objectifs en valeur relative du décret tertiaire (14)

L'objectif en valeur absolue correspond à un niveau de consommation fixé en valeur absolue défini pour chaque type de bâtiment et d'activité.

Parallèlement à ces trois échéances, le décret tertiaire oblige à une déclaration annuelle des consommations énergétiques sur la plateforme OPERAT (Observatoire de la Performance Energétique, de la Rénovation et des Actions du Tertiaire), gérée par l'ADEME. De son côté, OPERAT apporte une modulation des consommations en fonction des conditions climatiques mais également une modulation en fonction du volume de l'activité (intensité d'usage).

L'enjeu de ces réglementations est ainsi d'adapter les bâtiments actuels et futurs par la mise place de solutions concrètes permettant la diminution des consommations énergétiques. L'efficacité, la sobriété et le développement d'énergies renouvelables apparaissent ainsi comme des axes à développer. Ces trois piliers sont les axes majeurs de la stratégie négaWatt, inventée par Amory Lovins, désignant « de manière globale l'énergie non consommée ou économisée par des actions de sobriété ou d'efficacité énergétique. » (15)

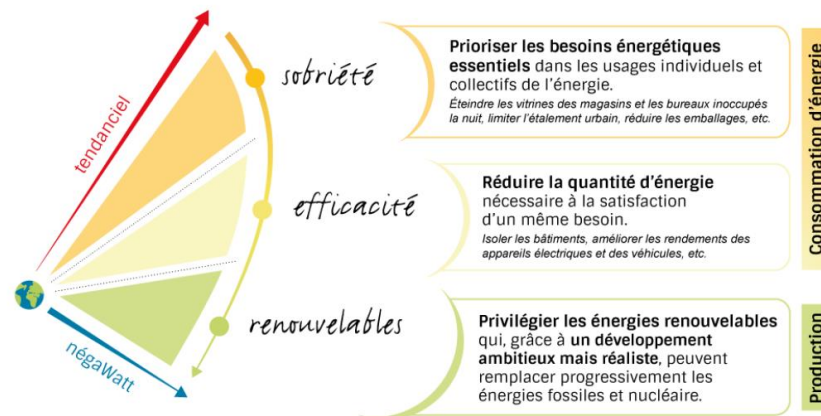


Figure 12 : La démarche négaWatt (15)

1.4 Les enjeux de qualité d'environnement intérieur pour les occupants

1.4.1 Les paramètres de la qualité d'environnement intérieur

Comme énoncé précédemment, la nécessité d'une sobriété énergétique des bâtiments est un enjeu crucial. Néanmoins, il s'agit également de favoriser la qualité d'environnement intérieur pour les occupants. En effet, de nos jours, les bâtiments ne peuvent être conçus uniquement pour la poursuite d'objectifs de durabilité environnementale si cela entraîne une gêne ou une mauvaise santé pour les occupants. En plus de contribuer au respect de l'environnement et à la sobriété énergétique, les bâtiments doivent également favoriser le bien-être de l'occupant.

Effectivement, il apparaît que l'environnement bâti est l'un des déterminants de la santé, dans lequel nous passons environ 80% de notre temps. L'air intérieur pourrait d'ailleurs y être jusqu'à cinq fois plus pollué selon le rapport de l'ADEME en 2019 (16). Aussi, il impacte directement nos performances cognitives. Par exemple, la surchauffe dans les bâtiments non résidentiels est l'une des plaintes les plus courantes dans les enquêtes auprès des usagers et est associée à une diminution des performances cognitives même dans des conditions de chaleur douce (17).

Cet environnement prend en compte les conditions fournies à l'intérieur des bâtiments, puisque la plupart d'entre nous passent la grande majorité de notre temps à l'intérieur. Mais cela s'étend aussi à l'environnement extérieur et à la façon dont nos quartiers et nos villes sont planifiés.

L'enjeu actuel est ainsi de pouvoir prendre en compte dès la conception du bâtiment les notions de qualité environnementale intérieure afin d'assurer une sécurité et un confort optimal aux usagers. Mais il s'agit également de prendre en compte ces notions dans l'existant avec des diagnostics en vue d'éventuelles rénovations. Plusieurs facteurs interviennent dans l'environnement intérieur et impactent la santé, le confort et le bien-être. On retrouve notamment les conditions thermiques,

l'humidité relative, l'acoustique, l'éclairage mais aussi la qualité de l'air. La figure ci-dessous résume ces facteurs et leurs interdépendances.

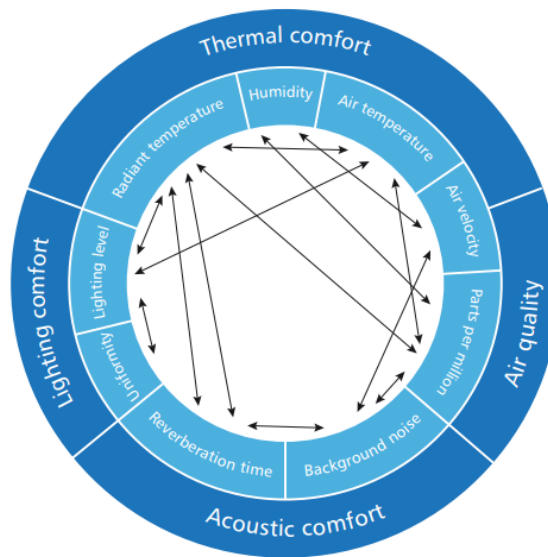


Figure 13 : Les paramètres du confort thermique et leurs interdépendances (18)

1.4.2 La notion de confort thermique et ses composantes

Le confort thermique est dépendant en premier lieu de quatre paramètres environnementaux (paramètres d'ambiance) :

- **L'humidité relative** : l'humidité relative (en %) permet les échanges par évaporation cutanée. Elle s'exprime ainsi : $HR (\%) = \frac{P_{vap}}{P_{Sat}(T)} \times 100$ avec $P_{Sat}(T)$ la pression saturante et P_{vap} la pression partielle de l'eau dans l'air. La plage d'humidité acceptable se situe entre 30% et 70%. (19)
- **La température de l'air** : les échanges thermiques entre l'ambiance et le corps humain sont créés par la température de l'air et des parois. Lorsque que les vitesses d'air sont faibles, la température ressentie par les occupants s'approche comme la température opérative : $T_{opérative} = \frac{T_{Air} + T_{Parois}}{2}$
- **La vitesse de l'air** : la vitesse de l'air permet de favoriser les échanges par convection. Elle est particulièrement intéressante en été car, même si elle n'abaisse pas la température de la pièce, elle procure une sensation de fraîcheur pour les occupants. En revanche, en hiver et à partir de certains seuils, elle peut générer un inconfort.
- **Les paramètres d'inconfort localisés** : ceux-ci sont directement liés à une hétérogénéité des ambiances. On retrouve alors par exemple un inconfort lié à une asymétrie de rayonnement, un gradient vertical trop élevé ($> 3^{\circ}K$) ou encore une température de sol inadéquate ($> 26^{\circ}C$ et $< 19^{\circ}C$). (19)

Ce sont sur ces paramètres que les concepteurs peuvent agir. En effet, des paramètres intrinsèques à chaque individu influent également sur le confort thermique avec notamment le métabolisme et la vêtue. Ces paramètres font partie intégrante de la thermorégulation. La thermorégulation, comprenant deux dimensions, permet à l'Homme de s'adapter en fonction des conditions climatiques. Dans un premier temps, la thermorégulation est comportementale, c'est-à-dire que l'Homme adapte son comportement en fonction du contexte : en climat chaud, on a par exemple la recherche de l'ombre, la ventilation, l'allègement de l'habillement, ... Néanmoins, l'avènement de la société moderne a impacté cette adaptation. Les horaires de travail conventionnels, les postes fixes ou bien encore certains types d'habitation ont bridé cette adaptation comportementale, au détriment de l'utilisation de la climatisation, solution du moindre effort. Dans un second temps, cette thermorégulation est physiologique, en portant sur les effets physiques modifiant les échanges entre le corps et son environnement tels que la sudation, la vasodilatation ou la vasoconstriction. (19)

Ainsi, le confort thermique apparait comme une notion complexe qui varie ainsi en fonction d'une large gamme de paramètres environnementaux ainsi que de paramètres contextuels tels que les activités, la culture, l'état psychologique, la motivation et les préférences individuelles des occupants. Dès lors, d'une manière générale, le confort thermique est ainsi généralement défini comme « cet état d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique » (20)

La notion de confort thermique a évolué au fil des normes, standards et modèles de confort thermique. On note ainsi plusieurs modèles présentés succinctement ci-dessous :

Le modèle de Fanger : dans ce modèle, un indicateur, appelé le PMV (Predicted Mean Vote) est calculé à partir des paramètres d'ambiance énoncés précédemment et des paramètres propres à chaque individu. Cet indicateur de confort s'échelonne suivant 7 niveaux et représente l'avis moyen d'un groupe de personnes concernant la sensation de confort thermique. Ainsi, pour un PMV compris entre -0.5 et 0.5 (conditions de confort thermique optimales), il apparait que la plage de température est comprise entre 21 et 26°C. Ce modèle de Fanger a été repris dans la norme NF EN ISO 7730 en vigueur actuellement et trois principaux indicateurs ont été ajoutés : PPD (Predicted Percentage Dissatisfied), et deux indicateurs d'inconfort locaux (pour les différences locales de températures et les turbulences). Le PPD indique le pourcentage de personnes éprouvant de l'inconfort. (19)

Froid	Frais	Légèrement Frais	Neutre	Légèrement tiède	Tiède	Chaud
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Figure 14 : Echelle de notation du modèle de Fanger

Les modèles de confort adaptatif : d'après les études de l'ASHRAE au début des années 2000, le modèle de Fanger n'est valable en été uniquement pour les bâtiments climatisés. L'approche du confort adaptatif, étudiée notamment par le laboratoire PHASE de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, met en avant le fait que ce confort dépend également de l'adaptation de l'individu à l'environnement. Une

adaptation accrue des individus a notamment été constatée dans les bâtiments ventilés naturellement, comme le met en évidence le graphique ci-dessous.

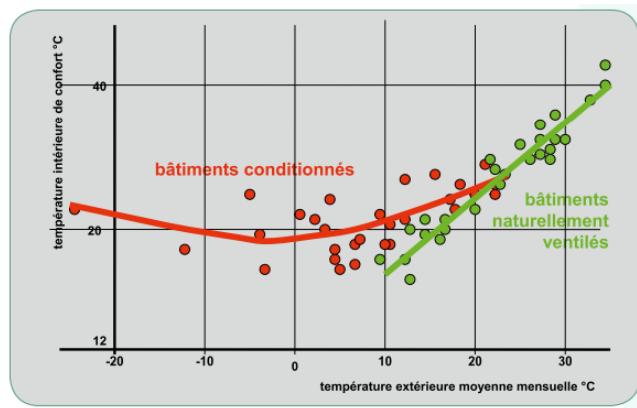


Figure 15 : Graphique de la température intérieure de confort en fonction de la température extérieure moyenne mensuelle et du type de bâtiment (19)

Ces études ont notamment fait évoluer et émerger de nouveaux standards avec le standard ASHRAE de 2004 qui module la zone de confort en fonction de la température extérieure, ou encore la norme européenne EN 15251 de 2007.

Finalement, la principale limite du modèle de Fanger est la prise en compte de la vitesse de l'air de manière négative, quel que soit la saison. Le modèle de Givoni intègre l'évapotranspiration et définit de nouvelles plages de confort thermique, sur un digramme de l'air humide, en fonction des vitesses de l'air. Conçu pour une activité sédentaire et un habillement adapté à l'été, il se présente comme cela :

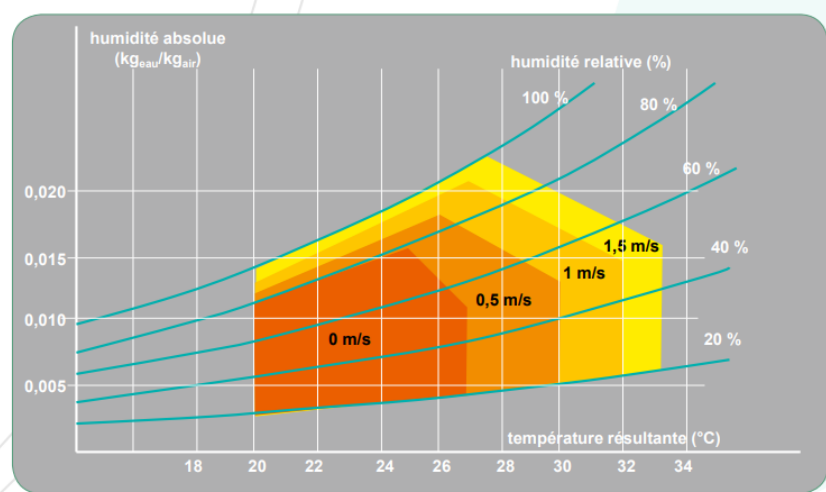


Figure 16 : Diagramme de Givoni (19)

Pour conclure, on sait qu'il existe une variabilité dans les réactions de confort thermique des personnes. Il n'est pas possible de concevoir des normes pour des conditions thermiques universellement « optimales » tant les paramètres qui influent sur le confort thermique sont nombreux et dépendants des individus. Finalement, toutes les normes de confort ont des limites car elles essaient de donner des définitions précises alors que le phénomène qu'elles décrivent est par nature imprécis et difficilement quantifiable. Néanmoins, ces standards sont indispensables et constituent un socle solide pour les concepteurs de bâtiment.

1.4.3 Focus sur la surchauffe en été et la notion d'îlots de chaleur urbain

1.4.3.1 Quelques causes des surchauffes en été

Comme évoqué précédemment, le confort thermique est une notion complexe. Un certain nombre de facteurs impactent directement le confort thermique des occupants et aujourd'hui, de plus en plus de surchauffes estivales sont constatées. Ces surchauffes trouvent leur origine à la fois dans la conception de bâtiments modernes mais aussi dans le réchauffement climatique. Ainsi, ces surchauffes sont liées en partie aux facteurs suivants, illustrés sur la figure ci-dessous :

-Des gains de chaleurs à travers de larges surfaces vitrées non abritées et non pourvues de systèmes d'occultation performant. (N°3)

-Des apports internes : les appareils électriques, l'activité humaine ou encore la production d'ECS participent à un dégagement de chaleur à l'intérieur du bâtiment. (N°4)

-Une isolation importante et une très bonne étanchéité à l'air des logements neufs ou rénovés retenant davantage la chaleur en période de forte chaleur. Si la ventilation n'est pas assez performante, toute la chaleur n'est pas évacuée. (N°5)

-Une possibilité de ventilation naturelle restreinte en raison de l'unilatéralité de l'habitation. (N°5)

-Une méconnaissance et/ou une incompréhension des bonnes pratiques de la part des usagers concernant les systèmes mis en place et les stratégies à mettre en place.

-Le phénomène d'îlot de chaleur urbain ne permettant pas une diminution des températures extérieures, notamment la nuit. (N°2)

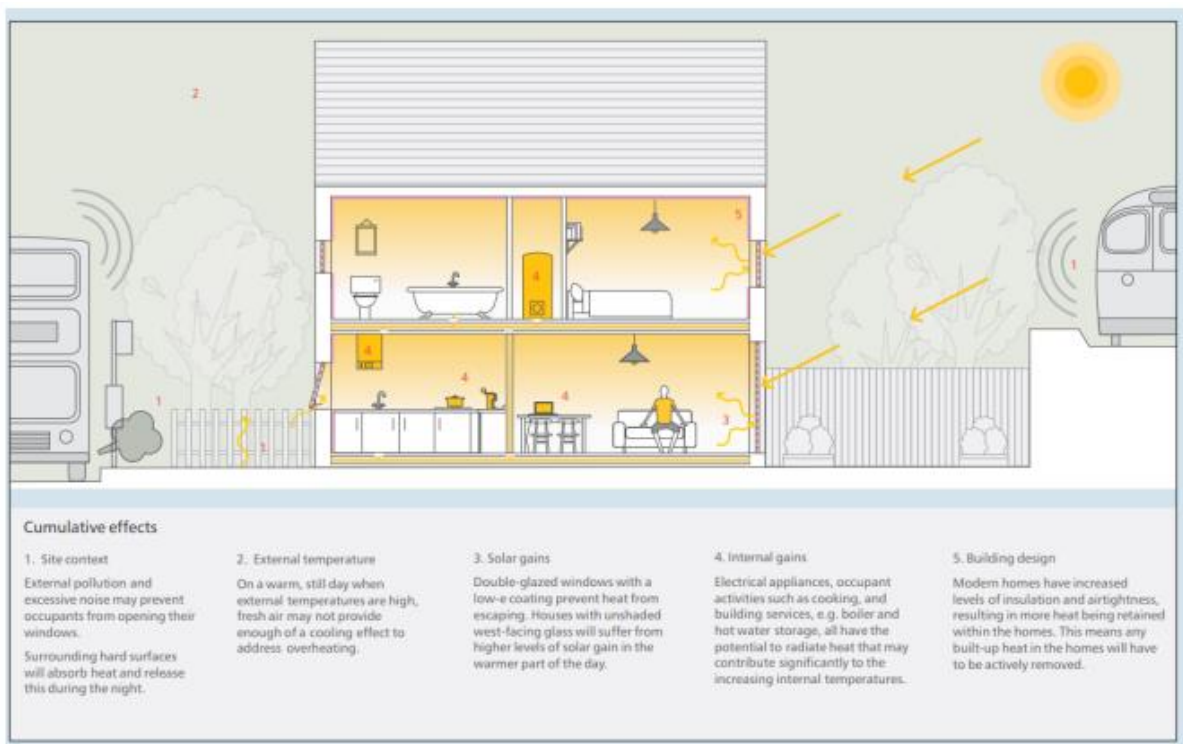


Figure 17 : Les effets cumulatifs responsables d'une surchauffe dans le bâtiment (21)

1.4.3.2 Les ilots de chaleur urbains (ICU)

Plus précisément, les ilots de chaleur urbains (ICU) désignent, en particulier la nuit, des températures d'air et de surface plus élevées dans les centres-villes que dans les périphéries. Plusieurs facteurs participent à ce phénomène (22) :

- L'urbanisation du sol avec des sols minéralisés et l'absence de végétalisation
- L'activité humaine qui concentre en centre-ville des sources de chaleur telles que les systèmes de climatisation, les usines, les réseaux de chaleur, ...
- Les matériaux employés qui se comportent comme des capteurs solaires. Ces matériaux stockent la chaleur (15 à 30% plus que dans les zones moins denses) en journée et la restituent la nuit, expliquant dès lors le phénomène d'ICU plus important la nuit. Ces matériaux sont principalement des surfaces de couleur sombre (goudrons, béton, ...) favorisant l'absorbance du rayonnement solaire.
- La morphologie urbaine des centres-villes avec la création d'obstacles pour les vents. Le régime des vents diminue ce qui réduit considérablement son action. En effet, le régime des vents favorise l'évapotranspiration et participe à la dissipation de la chaleur accumulée le long de la journée.

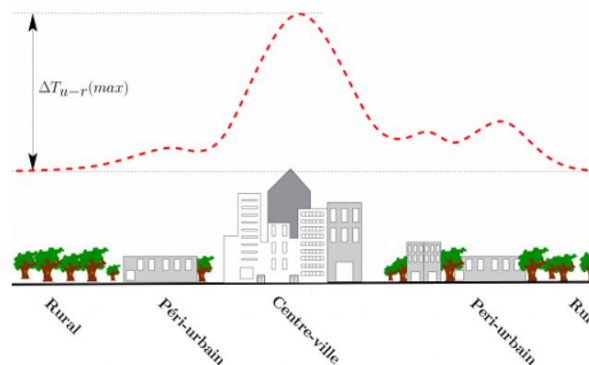


Figure 18 : Le phénomène d'îlots de chaleur (22)

Il apparaît ainsi que les deux facteurs jouant un rôle majeur sont l'albédo et le potentiel d'évapotranspiration. L'albédo d'un matériau désigne sa capacité à réfléchir un rayonnement incident. L'enjeu est de sélectionner des matériaux avec un albédo approprié afin qu'ils réfléchissent une part importante des rayonnements. Actuellement, la plupart des matériaux utilisés dans les zones urbaines absorbent une grande part du rayonnement solaire incident. A cela s'ajoute un faible taux de végétalisation dans les centres urbains (la pelouse a un albédo entre 0,25 et 0,3). Ensuite, le second facteur est le potentiel d'évapotranspiration par le biais de la végétalisation. Celle-ci permet par le phénomène d'évapotranspiration un rôle de régulateur thermique.

1.5 La méthodologie typique mise en place pour répondre à ces enjeux actuels : l'audit énergétique associé à une étude de confort thermique

1.5.1 Le déroulé d'une démarche classique

On voit ainsi que le secteur du bâtiment présente de nombreux enjeux et défis à saisir, aussi bien sur la consommation énergétique que sur la qualité d'environnement intérieur intégrant le confort thermique, l'humidité relative, la qualité de l'air ou bien encore le confort d'été.

Afin de saisir ces opportunités et de répondre aux objectifs fixés, l'audit énergétique permet de définir des interventions sur le bâti afin de réaliser des économies d'énergie. Cet audit permet ainsi au maître d'ouvrage de définir clairement sa stratégie dans le but de se conformer aux exigences du décret tertiaire et notamment au premier objectif à l'horizon 2030. Il vise ainsi une meilleure maîtrise des consommations d'énergie et d'émissions carbone du bâtiment en engageant des travaux de rénovation, tout en assurant la pérennité de l'ouvrage dans le temps.

Plus précisément, l'audit énergétique se décompose globalement en cinq étapes.

Etape 1 : il s'agit dans un premier temps de réaliser un état des lieux du bâtiment d'un point de vue énergétique et technique afin de diagnostiquer la vétusté et la performance de l'enveloppe du bâtiment (parois opaques, menuiseries, ...) mais aussi de ses équipements techniques (production de chaleur, ventilation, éclairage, auxiliaires, ...). En parallèle de cette étape, le maître d'ouvrage se doit de transmettre les documents utiles au diagnostic comme les plans du bâtiment, les éventuelles anciennes études, la liste des travaux déjà effectués mais aussi les factures des dernières années. Ce diagnostic sert ainsi de point de départ pour les études et la définition des gisements d'économies d'énergie.

Etape 2 : le second temps correspond au bilan énergétique du bâtiment en tenant compte de l'état des lieux préalablement établi. La modélisation thermique dynamique du bâtiment, faite sur logiciel (DesignBuilder, Pleiades+Comfie, ...), comprend la modélisation 3D du bâtiment ainsi que son découpage en zones thermiques cohérentes et homogènes. La composition des parois et les différentes menuiseries sont implantées dans le modèle. Enfin, les scénarios d'occupations, de température et de fonctionnement des équipements (CVC, éclairage artificiel, puissance dissipée, ...) sont créés.

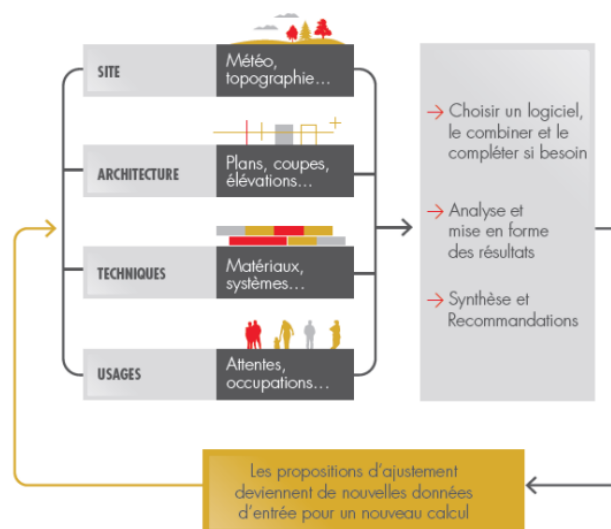


Figure 19 : Démarche de la Simulation Thermique Dynamique (23)

Etape 3 : une fois le modèle établi sur le logiciel, il s'agit de caler l'état initial par rapport aux consommations réelles du bâtiment. Un modèle est calé lorsqu'il présente $\pm 5\%$ d'écart par rapport aux consommations réelles. Cette phase de calage, plus ou moins longue selon les cas, nécessite d'adopter un regard critique sur le modèle en considérant quelques points : différences entre données d'entrée et hypothèses, cohérence de la station météo, fiabilité des scénarios...

Etape 4 : une fois le modèle établi, la troisième phase correspond à l'identification des gisements d'économies d'énergie et les préconisations de travaux ainsi que leurs chiffrages. Des interventions sont ainsi proposées et ces dernières comprennent le gain énergétique, financier et environnemental ainsi que le temps de retour sur investissement et le coût associé. Afin d'obtenir ces informations, ces interventions sont simulées à partir de l'état initial en lançant un calcul SED (avec systèmes). Un fichier de post-traitement permet de calculer les gains à partir des données brutes issues du logiciel.

	PERF. Rentabilité énergétique kWhes/ k€ ₀₀₀₀₀₀	ECONOMIE						ENVIRONNEMENT				Scénarios			
		TRA ans	Coût des travaux		Valorisation CEE €	Economie annuelle €TTC	Economie annuelle		CO ₂ évité						
			€HT	€/m ²			Énergie FINALE		annuellement						
							kWh EF/PCI	%	t _{eq-co2}	%					
Pilotage	Mise en place d'un plan de comptage	0	>30	7 000	3	0	0	0	0%	0	0%	X	X	X	X
Pilotage	Mise en place de robinets thermostatiques - Partie GEEP	3 703	2	5 500	2	311	2 424	22 217	7%	5	8%	X	X		
Pilotage	Mise en place de robinets thermostatiques - Partie GEEP + extension	4 190	2	6 500	2	683	3 582	25 141	8%	6	9%			X	X
Travaux sur le bâti	Reprise de l'isolation de la toiture-terrasse et remplacement du bac acier - R = 7,3	63	>30	230 000	83	9 321	2 554	14 534	5%	3	5%	X	X	X	X
Travaux sur le bâti	Remplacement des façades GEEP par une façade en ossature bois + remplacement de menuiseries + BSO	80	>30	783 000	283	9 621	6 933	62 802	20%	15	23%	X	X	X	X
Travaux sur le bâti	Remplacement des menuiseries SV hors logement et GEEP	197	14	78 000	28	1 397	4 286	15 330	5%	3	5%	X	X		
Travaux sur les systèmes	Mise en place d'une ventilation SF (hors logement)	-757	>30	46 000	17	6 384	-6 069	-34 831	-11%	-7	-11%	X	X		
Travaux sur les systèmes	Mise en place d'une ventilation DF avec récupération de chaleur (hors logement)	-67	>30	172 000	62	8 512	-4 200	-11 600	-4%	-1	-2%			X	X

Figure 20 : Exemple d'un tableau récapitulatif des interventions proposées pour un établissement scolaire (24)

Etape 5 : finalement, des scénarios mêlant ces interventions sont créés afin de répondre aux objectifs fixés par le décret tertiaire. Un premier scénario est proposé afin d'atteindre l'objectif à 2030 du décret tertiaire. Un second permet l'atteinte à l'horizon 2050. Dans le cadre du patrimoine d'une collectivité, par exemple, un Schéma Directeur Energie (SDE) peut être mis en place en suivant la méthodologie globale suivante : cartographie du patrimoine (comparaison des sites), définitions des enjeux et objectifs, élaboration du schéma avec la planification des investissements, et suivi dans le temps de l'atteinte des objectifs.

Parallèlement à l'audit énergétique, une étude de confort peut être demandée. Dans le cas d'une étude de confort d'été, les systèmes ne sont pas considérés dans la simulation et un fichier météo de type caniculaire est utilisé. L'étude se fait de manière plus fine avec la création d'enveloppes aérodynamiques contenant les zones spécifiquement étudiées. Ces zones représentent les pièces les plus défavorables

et assurent ainsi une bonne représentation du bâtiment. De plus, les scénarios d'occultation et d'ouverture des menuiseries nécessitent une attention particulière. A partir de ces éléments, un état initial est défini. Il s'agit ici d'un calcul STD (sans systèmes) qui servira de base à l'étude de confort. Comme pour l'audit énergétique, les interventions sont calculées à partir de l'état initial et des indicateurs sont calculés afin de mesurer l'efficacité des solutions testées. Ces indicateurs seront présentés plus spécifiquement en partie 3.3.3 du rapport.

Ainsi, la phase d'identification des interventions constitue une phase importante dans la démarche puisque c'est sur la base de ces préconisations et scénarios de travaux que va se baser le maître d'ouvrage en vue d'obtenir des gains à la fois sur la partie énergétique et sur le confort.

Une des pistes encore peu préconisée aux clients est la mise en place de matériaux à changement de phase. Comme énoncé en introduction du rapport, le but est ainsi d'étudier l'impact des matériaux à changement de phase sur la consommation énergétique et sur le confort d'été. Il s'agit également d'étudier les facteurs influençant leur efficacité.

1.5.2 Présentation spécifique du logiciel de STD utilisé dans l'étude

Dans notre étude, le logiciel de simulation thermique dynamique utilisé est Pleiades+Comfie (v 5.23.6.1), développé par Izuba Energies. Le moteur de calcul est développé par le centre d'efficacité énergétique des systèmes de Mines ParisTech, et « a été validé expérimentalement (plateforme INCAS, cellule PASSYS) et par comparaison inter-logiciels (BESTEST de l'AIE) ». (25)

Il permet notamment de réaliser des STD (Simulation Thermique Dynamique), des SED (Simulation Energétique Dynamique), des calculs lumineux, des calculs aérauliques ou encore l'exploitation des résultats directement sur le logiciel.

Pour les calculs, les fichiers météo sont issus du logiciel Meteonorm qui propose plus de 220 stations météorologiques. Dans le cas d'un audit énergétique, un fichier météo dit « moyen » est utilisé. Izuba Energies précise que « Les données de température proviennent de moyennes mensuelles sur 10 ans (2000 à 2009) issues de la base Globalsod (collectées par le NCDC – National Climatic Data Center – USA) ». Pour une étude de confort d'été, un fichier météo de type caniculaire est utilisé. Ce fichier caniculaire « récupère les mêmes données que le fichier scénario moyen avec des données estivales qui ne sont plus des moyennes mensuelles des dix dernières années, mais des températures maximales des dix dernières années pour la période estivale (mai à septembre) ». (26)

Enfin, lors des simulations, le calcul s'est fait sur une année avec un pas de temps de 30 minutes. Pour notre étude sur les MCP, le logiciel présente quelques limites : deux MCP ne peuvent être mis sur la même paroi et un MCP ne peut être mis sur les parois internes au sein d'une même zone thermique. Les parois internes peuvent néanmoins être équipées de MCP si les pièces n'appartiennent pas à la même zone thermique. La bibliothèque générale de Pleiades contient quelques MCP dont les valeurs sont certifiées par les fabricants (DuPont, Winco Technologies et BASF).

2 Etat de l'art sur les MCP

Cette seconde partie présente spécifiquement les matériaux à changement de phase, en étudiant successivement la théorie du changement de phase d'un matériau puis les types de matériaux à changement de phase existants, leurs propriétés et leur mise en œuvre possible.

2.1 Les méthodes de stockage de l'énergie thermique

Le stockage de l'énergie thermique permet de nombreux bénéfices dans le domaine du bâtiment. Il permet notamment de pouvoir palier l'inadéquation entre la demande et la disponibilité. En libérant l'énergie stockée lorsque les températures diminuent, le stockage permet de lisser les fluctuations de température au cours de la journée et le recours au chauffage ou à la climatisation. L'utilisation, notamment de la chaleur latente, permet de maintenir une température intérieure globalement constante grâce à l'accumulation thermique du matériau employé.

On compte plusieurs méthodes de stockage de cette énergie thermique : un stockage par chaleur sensible, un stockage par chaleur latente et un stockage par processus chimiques que nous allons successivement présenter ci-dessous.

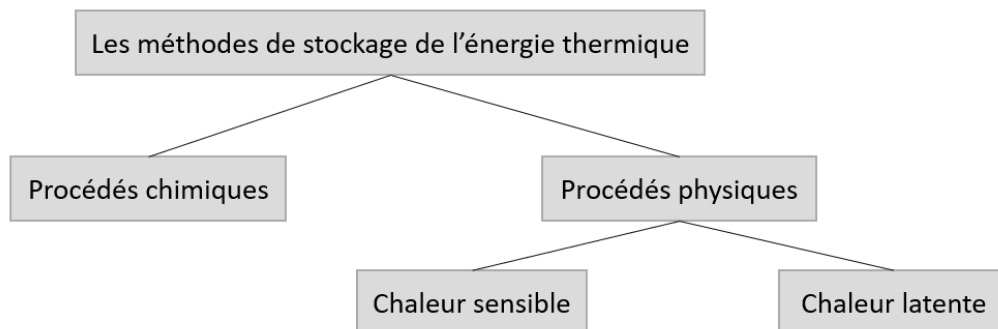


Figure 21 : Les différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique

- **Le stockage lors d'une réaction chimique** : l'énergie thermique va être stockée au cours d'une réaction chimique. La différence d'enthalpie entre le début et la fin de la réaction, nommée chaleur de réaction, sera soit absorbée (réaction endothermique), soit libérée (réaction exothermique).
- **Le stockage par chaleur sensible** : il n'y a pas de changement d'état. Le matériau va absorber ou bien céder de l'énergie par la seule modification de sa température. La grandeur qui caractérise la chaleur échangée est la chaleur massique, notée C_p . Par exemple, dans le cas de l'eau, la chaleur massique est de 4,19 kJ/kg.K. La quantité d'énergie stockée Q_{12} est alors égale à $Q_{12} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT$
Si la chaleur massique reste constante, la relation devient : $Q_{12} = m \times C_p \times \Delta T = \rho V \times C_p \times \Delta T$. Cette quantité d'énergie varie ainsi en fonction de la masse m du matériau,

de sa chaleur massique C_p et de l'écart de température ΔT auquel il est soumis. Ainsi, pour chauffer un litre d'eau de 0°C à 100°C , il faut fournir $Q_{sensible} = 1 \times 4,19 \times ((100 + 273,15) - (0 + 273,15)) = 419 \text{ kJ}$.

- **Le stockage par chaleur latente :** le matériau va absorber ou céder de l'énergie lors du changement d'état. La grandeur qui caractérise la chaleur échangée est la chaleur latente de changement de phase. Pour un changement de phase de liquide à solide, elle est notée L_f . Pour un changement de phase de liquide à vapeur, elle est notée L_v . Ainsi, lors de la fusion du matériau, une certaine quantité de chaleur est dégagée, identique à celle de la solidification.

Ainsi, un matériau va stocker dans un premier temps l'énergie sous forme de chaleur sensible. Puis, lorsque la température atteinte est celle de sa température de changement de phase (zone de transition), alors le matériau stocke l'énergie sous forme de chaleur latente. Enfin, le matériau stocke de nouveau de l'énergie sous forme de chaleur sensible jusqu'à atteindre sa température finale. La figure ci-dessous illustre ce phénomène.

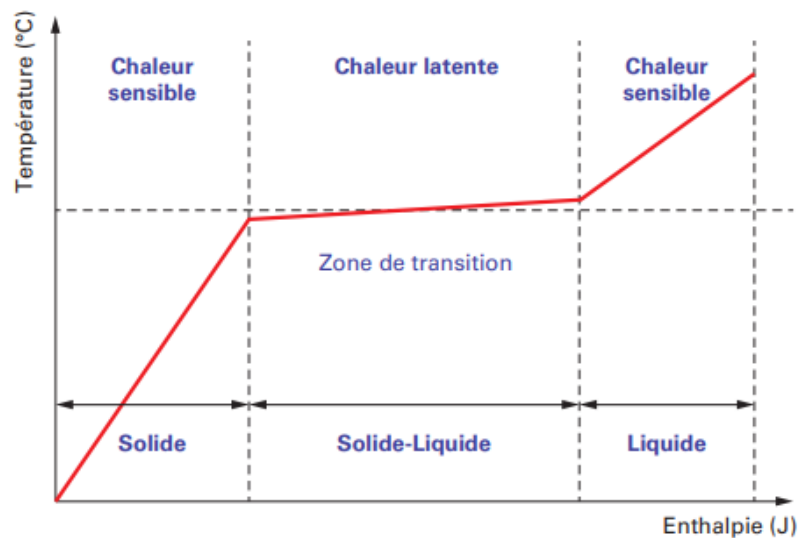


Figure 22 : Graphique présentant l'enthalpie d'un corps en fonction de la température lors d'une transition solide/liquide (27)

Ainsi, l'énergie stockée est égale à :

$$Q = \int_{T_i}^{T_{fus}} m C_{p_{solide}} dT + m l_{fus} + \int_{T_{fus}}^{T_f} m C_{p_{liquide}} dT$$

$$Q = m \times [l_{fus} + C_{p_{solide}}(T_{fus} - T_i) + C_{p_{liquide}}(T_f - T_{fus})]$$

Avec

$C_{p_{liquide}}$ et $C_{p_{solide}}$: capacités thermiques massiques du matériau liquide, et solide

T_i : température initiale

T_{fus} : température de fusion

T_f : température finale

l_{fus} : chaleur latente de fusion du matériau

Le stockage par chaleur sensible est la méthode de stockage la plus ancienne et est également la plus facile à mettre en œuvre. Dans le domaine du bâtiment, en milieu liquide, l'eau apparaît comme un matériau intéressant (circuits de chauffage, eau chaude sanitaire, ...). Néanmoins, l'inconvénient du stockage par chaleur sensible par rapport au stockage par chaleur latente est sa faible densité énergétique. Ceci nécessite ainsi de grands volumes. En milieu solide, le béton, le sol ou encore les roches sont intéressantes pour le stockage de chaleur, en raison de leur grande disponibilité et leur faible coût. Ainsi, le tableau ci-dessous présente les caractéristiques thermiques de quelques matériaux solides et liquides utilisés généralement dans le bâtiment.

Matériau	Température (°C)	Masse Volumique (kg/m ³)	Capacité thermique massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique volumique (kJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Béton	0 à 150	2250	1130	2542	0,9 à 1,3
Roche compacte	/	2600	800	2080	2,5
Fer	< 1500	7900	450	3510	73
Aluminium	< 660	2700	900	2430	205 (30°C)
Brique réfractaire	Elevée	3000	1130	3390	5
Brique	/	1700	840	1430	0,7
Eau	0 à 100	1000	4190	4190	0,3
Huiles minérales	-10 à +340	750	2100	1580	0,11

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux de construction, solide et liquide (27)

Comme évoqué précédemment, parmi les matériaux de construction classiques, les matériaux présentant les meilleures caractéristiques pour le stockage/déstockage sont notamment les pierres tendres, le béton ou encore les briques pleines mais ces matériaux ont une capacité de déphasage restreinte. A l'inverse, les matériaux isolants (ouate de cellulose, laine de bois, ...) présentent des caractéristiques de stockage/déstockage limitées mais un meilleur déphasage. Le graphique ci-dessous illustre les propriétés de quelques matériaux en fonction de sa diffusivité et de son effusivité.

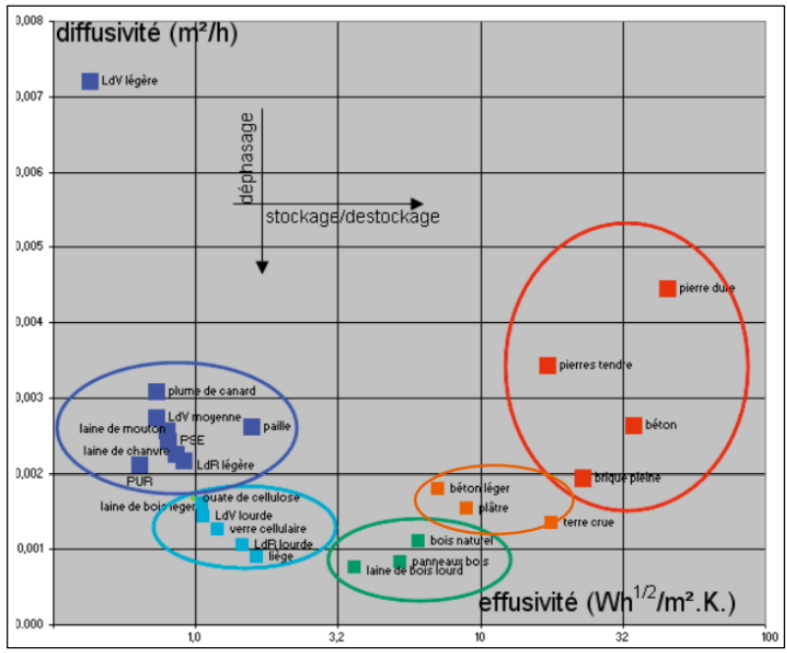


Figure 23 : Classification des matériaux en fonction de leur diffusivité et effusivité (19)

Pour illustrer les quantités d'énergie mises en œuvre dans le changement de phase par rapport à la chaleur sensible, nous comparons l'acétate de sodium trihydraté, utilisé comme MCP, et l'eau, sur la plage de température de 30°C à 70°C. Les caractéristiques de l'acétate de sodium trihydraté sont données en annexe 1.

En utilisant les formules présentées précédemment, on obtient ainsi les énergies accumulées suivantes :

$$E_{30-70 MCP} = 5,00 \times 10^8 J = 139 kWh$$

$$E_{30-70 Eau} = 1,67 \times 10^8 J = 46,4 kWh$$

Par rapport à l'eau, le MCP est ainsi en mesure de stocker trois fois plus d'énergie que l'eau, notamment grâce au changement de phase mettant en œuvre une grande quantité d'énergie. Ceci met alors en avant l'avantage de l'utilisation de la chaleur latente par rapport à la chaleur sensible.

2.2 La théorie du changement de phase : chaleur sensible et latente

2.2.1 Le diagramme de changement de phase

Maintenant que nous venons de voir les méthodes de stockage de l'énergie thermique et le mécanisme global, nous allons à présent détailler plus précisément la notion de changement de phase.

La matière peut se présenter sous plusieurs états : liquide, solide et gazeux. Ces états correspondent directement à des phases et on utilise ainsi les termes de « phase liquide », « phase solide » et « phase gazeuse ». Les changements d'état correspondent aux frontières entre ces différentes phases. On a ainsi la solidification pour le passage de liquide à solide ou bien encore la fusion de solide à liquide. En considérant un système de volume V constitué d'un corps pur, chacune de ces phases occupe un espace délimité par une pression P et une température T (Figure 25).

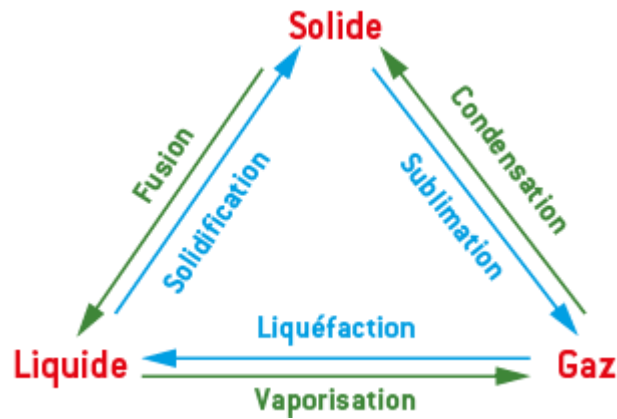


Figure 24 : Schéma des changements d'état (28)

Les changements de phases qui se produisent dans les parois du bâtiment sont considérés à pression constante. La pression correspond ainsi à la pression atmosphérique ou bien à la pression du système dans lequel le MCP est intégré (dans le cas d'une intégration dans un système actif tel qu'un échangeur). On peut ainsi considérer la transformation illustrée sur le schéma ci-dessous, à pression atmosphérique constante. Lors de l'évolution de la température du matériau, on a alors un déplacement sur la ligne verte. Lorsque $T < T_f$, le matériau est sous forme solide tandis que lorsque $T > T_f$, le matériau est sous forme liquide. T_f correspond à la température de changement d'état.

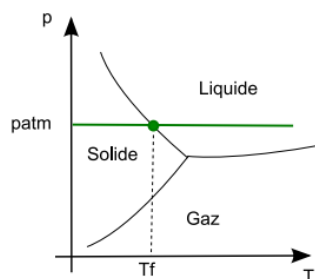


Figure 25 : Transformation représentée dans le diagramme des phases

2.2.2 Changement de phase dans le cas d'un corps pur idéal et réel

Dans le cas d'un corps pur idéal, le changement d'état a lieu à température constante T_f . Dans le cas d'un corps pur réel, mais aussi pour les mélanges, le changement d'état a lieu sur une plage de température plus ou moins étendue (noté ΔT_f sur le graphique ci-dessous). Comme expliqué précédemment, lorsque le matériau est soumis à un échelon de température $\Delta T = (T_1 - T_2)$ permettant le changement d'état, on note alors trois étapes principales (exemple du refroidissement d'un matériau) :

1. **Le refroidissement du matériau à l'état liquide** (de T_1 à T_f) : la chaleur sensible est dégagée
2. **Le changement de phase de liquide à solide** (sur ΔT_f , pour un corps réel/mélange) : la chaleur latente est libérée
3. **Le refroidissement du matériau à l'état solide jusqu'à la température finale** d'équilibre (de T_f à T_2) : la chaleur sensible est libérée

Les graphiques ci-dessous résument ces trois étapes dans le cas d'un corps pur idéal et réel.

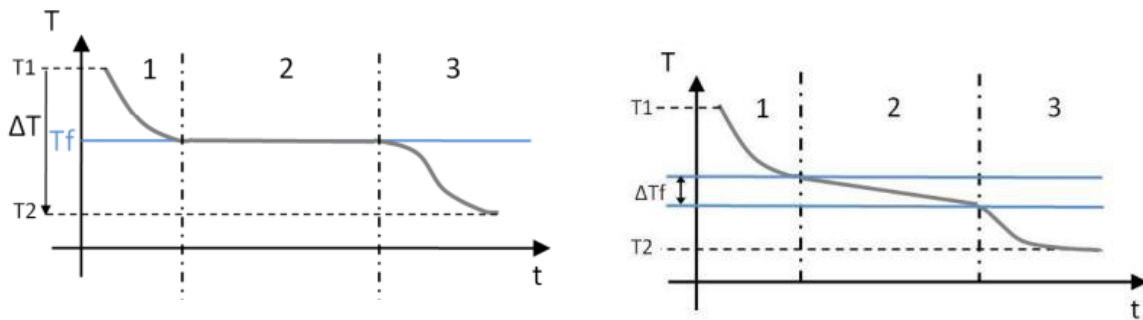


Figure 26 : Illustrations de l'évolution de la température d'un corps pur idéal (gauche) et d'un corps réel (droite) lors d'une solidification (29)

2.2.3 Les phénomènes relatifs à l'emploi des MCP

Des phénomènes annexes peuvent perturber le changement de phase présenté dans la figure précédente (Figure 26). On note en premier lieu la surfusion. La surfusion survient lorsque la température du liquide est inférieure à la température classique de solidification. L'inconvénient de la surfusion est la température de changement d'état qui n'est plus respectée. Ce phénomène est évitable en incorporant des impuretés dans le matériau.

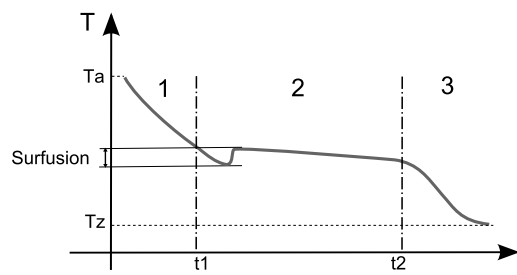


Figure 27 : Illustration du phénomène de surfusion (29)

On peut ensuite noter des problèmes de ségrégation. Dans le cas des sels hydratés, la fusion du matériau peut entraîner une ségrégation entre les sels et l'eau. Ceci a pour conséquence d'abaisser la température de fusion. L'incorporation de gélifiants ou d'épaississants peut résoudre ce problème en permettant de lier les sels hydratés ensemble.

Enfin, il s'agit de prendre en compte la tenue au feu et la corrosion de ces matériaux. Les MCP se doivent de respecter les réglementations en vigueur dans chaque pays. Afin d'améliorer la tenue au feu, des retardateurs de feu ou de flammes peuvent être utilisés pour certains matériaux. Concernant la corrosion, le caractère corrosif des sels hydratés doit être pris en compte dans la mise en œuvre du matériau (notamment lors de l'encapsulation du MCP). (27)

2.3 Définition des matériaux à changement de phase

2.3.1 Principes

Les matériaux à changement de phase (MCP), comme la plupart des matériaux, ont la capacité d'absorber, de stocker et de restituer l'énergie sous forme de chaleur. Par rapport à d'autres matériaux, ils sont capables de changer d'état physique dans une plage de température restreinte comprise environ entre 10°C et 80°C. Cet intervalle de température est intéressant car il inclut de nombreuses situations de la vie quotidienne (température d'une pièce, température de l'eau chaude sanitaire, ...). On peut alors par exemple choisir des matériaux dont le changement de phase a lieu à des températures proches de 20°C (température de confort d'hiver) et proches de 28°C (température de confort d'été). L'étude des MCP remonte au début des années 1960 avec des études sur les sels hydratés dans des systèmes de stockage de l'énergie. C'est à partir des années 1970 que les chercheurs ont exploré le potentiel des MCP organiques, offrant davantage de flexibilité et d'adaptabilité. A partir des années 1980/1990, on retrouve les premières applications dans le bâtiment comme climatisation passive mais également des intégrations dans les systèmes de stockage de l'énergie solaire. Comme évoqué précédemment, les changements d'état entre la phase liquide et solide sont les plus intéressants dans le domaine du bâtiment.

2.3.2 Inertie thermique et MCP

Plus précisément, le MCP peut être employé notamment pour améliorer l'inertie du bâtiment. L'inertie thermique d'un bâtiment est en effet directement liée au stockage de l'énergie thermique des matériaux qui le constituent. Ainsi, un bâtiment ayant une forte inertie thermique sera capable de stocker l'énergie lorsque les températures sont élevées et de la restituer lorsque les températures sont plus faibles. L'inertie permet ainsi de palier aux changements rapides de la température. On note deux types d'inertie : l'inertie de déphasage caractérisée par la diffusivité, et l'inertie de stockage caractérisée par l'effusivité. Les graphiques ci-dessous illustrent le phénomène global d'inertie.

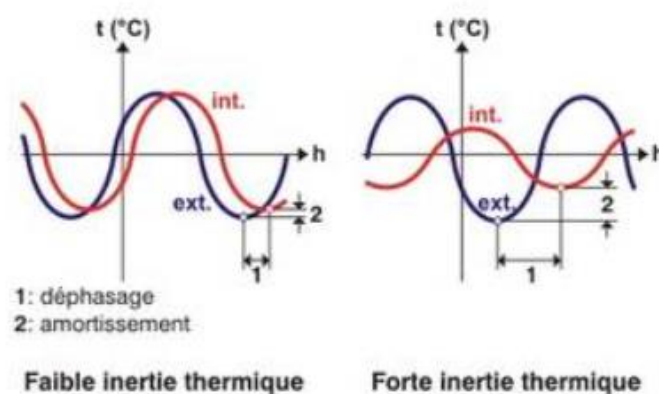


Figure 28 : Illustration du phénomène d'inertie thermique (30)

Les matériaux à changement de phase (MCP) étant des matériaux intéressants pour le stockage de l'énergie thermique permettent alors d'obtenir ou d'améliorer des bâtiments afin qu'ils présentent une forte inertie et ainsi de tirer parti de ce phénomène pour le confort d'été et le confort d'hiver.

2.4 Les matériaux utilisables pour le stockage de chaleur latente

Parmi les matériaux utilisables pour le stockage de chaleur latente, on retrouve des matériaux organiques (paraffines, ...), inorganiques et des eutectiques qui peuvent être un mélange de composés organiques et/ou inorganiques. Le schéma ci-dessous, extrait d'une étude sur l'utilisation des MCP dans le bâtiment résume les différents types de matériaux permettant de stocker cette chaleur latente.

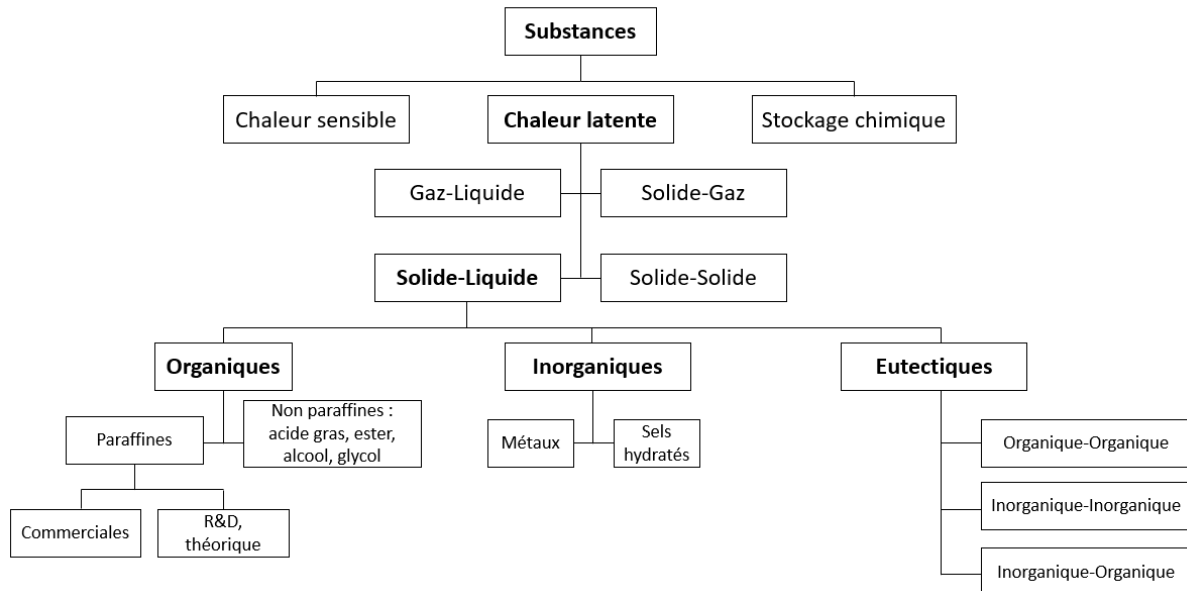


Figure 29 : Classification des substances pour le stockage d'énergie (31)

Dans l'idéal, un matériau utilisé comme MCP doit respecter certaines caractéristiques thermiques, physiques, cinétiques, chimiques et économiques (27,32).

Concernant les caractéristiques thermiques, le matériau doit avoir une plage de température de fusion adaptée et proche de l'usage que l'on souhaite en faire (globalement entre 10°C et 80°C selon son utilisation dans le bâtiment). La conductivité thermique du matériau ne doit pas être trop faible afin de permettre d'assurer les transferts thermiques. Enfin, la valeur de la chaleur latente massique doit être la plus grande possible.

Concernant les caractéristiques physiques, la dilatation volumique du matériau doit être relativement restreinte notamment pour la bonne tenue dans le temps du matériau et pour ne pas endommager son conditionnement. Les matériaux présentant une grande dilatation volumique ne pourront être utilisés en raison de la difficulté lors du conditionnement. Aussi, la densité doit être la plus élevée possible car cela permet d'avoir une plus grande compacité et de limiter les pertes thermiques du matériau.

D'un point de vue des propriétés cinétiques, le risque de surfusion doit être le plus faible possible et le matériau doit présenter un taux de cristallisation assez élevé.

Enfin, il faut aussi que les propriétés chimiques du matériau soient compatibles avec une utilisation dans le bâtiment. En effet, le matériau ne doit pas présenter de toxicité et être suffisamment résistant au feu afin de respecter les normes en vigueur. Le matériau doit finalement présenter une stabilité chimique afin de garantir une durabilité satisfaisante.

Sur le volet économique, ces matériaux doivent être disponibles en grandes quantités et présenter un coût raisonnable par rapport aux matériaux plus classiques.

Les MCP se classent globalement en trois catégories : organique, inorganique et eutectique. Le graphique ci-dessous compare les différents types de MCP existants en fonction de leur température et chaleur de fusion. Actuellement, les MCP sont particulièrement utilisés pour la climatisation et de nombreuses applications utilisent les paraffines et les sels hydratés, présentant des températures de fusion peu élevées et donc intéressantes.

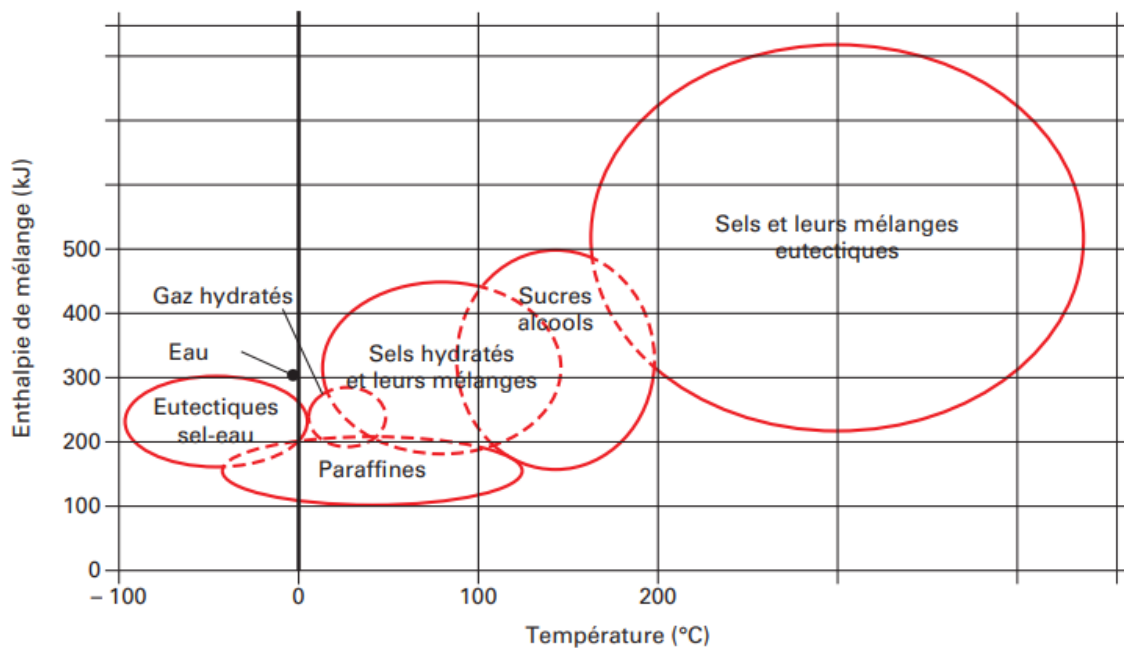


Figure 30 : Classification des principaux types de matériaux à changement de phase (27)

Nous allons à présent détailler chaque type de MCP en présentant également quelques matériaux et leurs caractéristiques.

2.4.1 Les organiques

Par définition, on appelle matériau organique tout matériau qui comporte au moins un atome de carbone lié à un atome d'hydrogène. Dans cette catégorie, on utilise notamment les paraffines et acides gras pour la constitution du MCP.

- Les paraffines : les paraffines sont des alcanes, de formule chimique C_nH_{2n+2} . Ce sont des molécules linéaires d'hydrocarbures saturés issues des résidus solides du pétrole. La température de fusion et la chaleur latente sont d'autant plus élevées que la chaîne carbonée est longue.

Nombres d'atomes de carbone	Température de fusion (°C)	Chaleur latente massique (kJ/kg)
14	5,5	228
15	10	205
16	16,7	237
17	22	215
18	28,2	245
20	36,7	246
29	49,4	238

Tableau 2 : Caractéristiques thermiques des paraffines linéaires (27)

- Les non-paraffines : on retrouve des esters, alcools, acides gras et glycols.

	Température de fusion (°C)	Densité (kg/m ³)	Chaleur latente massique (kJ/kg)
Acide Acétique	16,7	1050 ^(20C)	187
Glycérine	17,9	1260 ^(20C)	198,7
Acide D-Lactique	26	1249 ^(20C)	184

Tableau 3 : Caractéristiques thermiques de non-paraffines (27)

Les MCP organiques présentent ainsi une chaleur latente généralement comprise entre 120 et 230 kJ/kg. Ils ont pour avantages d'avoir une longue durée de vie, l'absence de phénomène de ségrégation et de surfusion et sont également inertes chimiquement. Les principaux inconvénients, en revanche, sont la variation de volume importante lors du changement de phase, des prix élevés, l'inflammabilité des matériaux et une conductivité thermique faible à l'état solide. De plus, les paraffines que l'on trouve dans le commerce sont d'origine pétrolière.

Ces matériaux peuvent néanmoins être améliorés avec l'ajout de produits antifeu et d'additifs pour améliorer la conductivité thermique.

2.4.2 Les inorganiques

Les MCP inorganiques sont principalement les sels hydratés, les sels fondus, les métaux purs et les alliages métalliques.

	Température de fusion (°C)	Chaleur latente massique (kJ/kg)
$K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$	14	109
$LiNO_3 \cdot 2H_2O$	30	296
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	29,8	109
$KFe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	33	173
$CaNO_3 \cdot 4H_2O$	47	153

Tableau 4 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux à changement de phase inorganiques (27,32)

Les MCP inorganiques présentent de nombreux avantages mais également des inconvénients importants quant à leur utilisation. Par rapport aux autres MCP, ces matériaux présentent des prix bas, une chaleur latente élevée, une conductivité thermique élevée et une ininflammabilité. En revanche, par rapport aux MCP organiques, ces matériaux présentent généralement des risques de surfusion, de ségrégation et de corrosion. De plus ils ont une durée de vie dans le temps limitée car ses propriétés thermiques se dégradent au cours des cycles de fusion/solidification.

Ces matériaux peuvent être améliorés avec l'ajout d'agents de nucléation pour le phénomène de surfusion et d'additifs pour améliorer sa durée de vie.

2.4.3 Les eutectiques

Les eutectiques utilisés comme MCP regroupent généralement plusieurs types de MCP. Il peut s'agir de mélange organique/organique, inorganique/inorganique et organique/inorganique. Ces matériaux sont peu utilisés dans la construction de bâtiment mais principalement dans le stockage de l'énergie solaire.

	Température de fusion (°C)	Chaleur latente massique (kJ/kg)
31% Na₂SO₄+ 13% NaCl+ 16% KCl+ 40% H₂O	4	234
26,5% C₅H₅C₆H₅+ 73,5% (C₆H₅)₂O	12	97,9
34 %C₁₄H₂₈O₂ + 66% C₁₀H₂₀O₂	24	147,7
50 %CH₃CONH₂ + 50% NH₂CONH₂	27	163
66.6% CaCl₂6H₂O + 33.3% MgCl₂6H₂O	25	95

Tableau 5 : Caractéristiques thermiques de quelques eutectiques (27,32)

Peu d'études concernent les eutectiques. Parmi les avantages, on peut citer la température de fusion élevée, sur une plage de température étroite et l'absence de ségrégation.

Pour conclure sur ces catégories, les MCP les plus intéressants à utiliser comme matériaux de construction sont essentiellement organiques. Leur grande stabilité, l'absence de ségrégation et de surfusion sont particulièrement intéressants, malgré leur coût élevé et leur faible conductivité thermique à l'état solide. Des matériaux commercialisés seront présentés en partie 2.5.3.

2.4.4 Conditionnement et coûts des MCP

Lors du changement d'état du MCP (notamment de solide à liquide) et afin que le MCP ne s'écoule pas, il s'agit de le conditionner. De plus, le conditionnement permet d'ajouter certains matériaux en quantité limitée afin de pallier certains problèmes tels que la surfusion, la ségrégation, l'inflammabilité ou encore la conductibilité.

Le matériau servant au conditionnement du MCP doit être compatible avec les autres matériaux dans lequel il sera intégré (plâtre, béton, ...). Il doit présenter une bonne conductivité, résister à la déformation lors des changements d'état du MCP et être assez résistant pour subir un grand nombre de cycles. Dès lors, trois techniques de conditionnement sont possibles (32).

- L'introduction directe du MCP dans le matériau : plâtre, béton, etc. Néanmoins l'introduction directe présente des risques d'écoulements du MCP lorsqu'il passe en phase liquide.
- Le conditionnement par macro-encapsulation : le MCP est incorporé dans un contenant comme des sphères, des panneaux, des billes ou des tubes. Ce contenant empêche ainsi les fuites de MCP et réduit les changements de volume externe lors du changement de phase. La macro-encapsulation est notamment utilisée pour l'intégration dans les systèmes actifs comme les échangeurs.

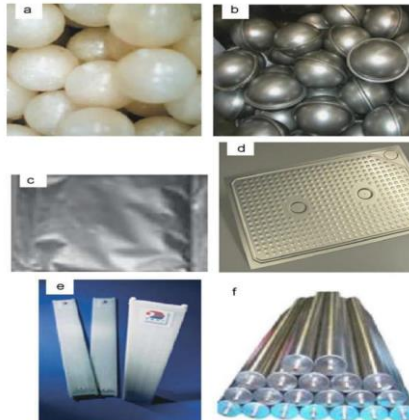


Figure 31 : Quelques exemples de conditionnement par macro-encapsulation (32)

- Le conditionnement par micro-encapsulation : le contenant du MCP est de très petite dimension, jusqu'à 20 μm . L'avantage par rapport à la macro-encapsulation est l'amélioration des transferts thermiques car ces matériaux possèdent une conductivité thermique élevée. Ce type de conditionnement est principalement utilisé pour la plage de température de fusion allant de -10°C à 80°C . Ce type de conditionnement permet une intégration aisée dans les matériaux de construction et le taux de transfert de chaleur est élevé en raison de l'augmentation de la surface par rapport au volume unitaire.



Figure 32 : Exemples de micro-encapsulation de la marque Rubitherm (29)

Concernant le coût de ces matériaux, le tableau ci-dessous met en évidence que les MCP organiques et inorganiques (acides gras) sont relativement bon marché. Ces coûts proviennent du département

américain de l'énergie. En effet, la cire de paraffine n'est qu'à 2 \$/kg par exemple et le chlorure de calcium (sel hydraté) est à 0,2 \$/kg. Comme nous l'avons évoqué précédemment, un conditionnement est nécessaire et l'ajout d'additifs est courant afin de pallier les éventuels problèmes de corrosion, de surfusion ou encore de ségrégation. C'est principalement ce conditionnement et l'ajout d'autres éléments qui impactent le prix final du produit commercialisé. Ainsi, un sel hydraté disponible dans le commerce coûte environ 25 fois plus cher que la matière première. (33) Les coûts de quelques matériaux commercialisés sont donnés en partie 2.5.3.

	Type de MCP	Coût (US \$/kg)
Cire de paraffine	Organique	1,88 à 2
Acide oléique	Organique (Acide Gras)	1,67 à 1,76
Acide stéarique	Organique (Acide Gras)	1,43 à 1,56
Chlorure de calcium	Inorganique (sels hydratés)	0,2
M-27	Acide gras commercialisé	14,26
Latest™29T	Sel hydraté commercialisé	4,95

Tableau 6 : Coûts de quelques MCP bruts et commercialisés (33)

2.5 Intégration des MCP dans le bâtiment

Dans le bâtiment, ces matériaux peuvent être mis en place de façon passive ou bien de façon active. L'intégration passive des MCP se fait au niveau de l'enveloppe du bâtiment. On intègre alors ces matériaux à changement de phase dans les murs, dans le plancher ou bien encore dans les fenêtres. La chaleur stockée durant la journée est ensuite libérée pendant la nuit sans système mécanique. Les échanges de chaleur se font directement avec la pièce. Dans le cas d'une utilisation active, le MCP est couplé à un système énergétique ou bien encore solaire par exemple. Dans les deux prochaines parties, nous détaillerons l'utilisation des MCP dans le cadre d'une intégration passive et active.

2.5.1 Intégration passive

Comme dit précédemment, dans le cas d'une intégration passive, il s'agit de mettre en place le matériau dans un des éléments constitutifs de l'enveloppe (parois verticales intérieures ou donnant sur l'extérieur, le plancher ou bien encore le plafond, les fenêtres, ...).

Ces MCP peuvent ainsi s'intégrer dans des plaques de plâtre, dans des enduits applicables sur des épaisseurs d'environ 15 mm ou encore dans des blocs de béton.

On retrouve également des applications dans les fenêtres et les stores. Pendant la journée, le store intérieur est exposé au soleil et la chaleur est absorbée lorsque le MCP fond. La nuit, en fermant le volet, la chaleur du MCP rayonne dans les pièces lorsque le MCP se solidifie.



Figure 33 : Stores équipés de MCP (34)

Enfin, on retrouve également des fenêtres avec des MCP (fabriqué notamment par la startup Glass X, créée par Dietrich Schwarz). Le MCP utilisé est un sel hydraté correspondant au chlorure de calcium hexahydraté ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), conditionné dans des microcapsules en polycarbonate. Sa plage de fusion est entre 26°C et 28°C . La fenêtre se compose globalement de trois couches : un verre prismatique permettant de réfléchir les rayonnements en été (le vitrage laisse passer les rayons lorsque leurs angles d'incidence sont inférieurs à 40°), une lame d'air et une couche contenant le MCP avec un $U_{\text{global}} < 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Le vitrage prismatique permet ainsi de laisser passer le rayonnement sans pertes en hiver alors qu'une réflexion totale a lieu une grande partie de la journée en été. 15 mm de ce matériau peuvent absorber autant de chaleur qu'un mur de béton de 25 cm à température ambiante. (35)

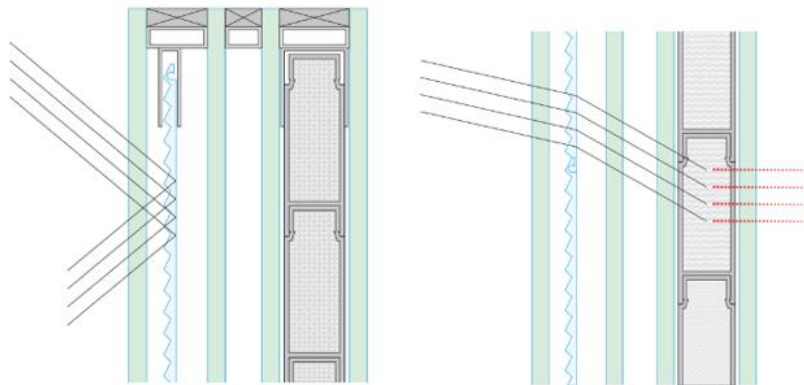


Figure 34 : Schéma de principe de fonctionnement du vitrage GlassX, rayons solaires estivaux (gauche) et hivernaux (droite) (36)

2.5.2 Intégration active

Les MCP peuvent aussi être intégrés à des systèmes actifs, tels que des échangeurs, notamment celui de Hed et Bellander (2005) détaillé ci-après. En effet, durant la nuit, le bâtiment est refroidi grâce à l'air extérieur transitant dans l'échangeur équipé de MCP. La température, plus fraîche que la journée, permet ainsi la solidification du MCP dans l'échangeur et donc la libération de la chaleur accumulée durant la journée. Cette chaleur est ainsi évacuée vers l'extérieur.

En journée, l'air intérieur chaud arrive dans l'échangeur et permet son stockage grâce à la liquéfaction du MCP. L'air ressortant de l'échangeur se retrouve ainsi refroidi et permet le refroidissement de l'intérieur du bâtiment.

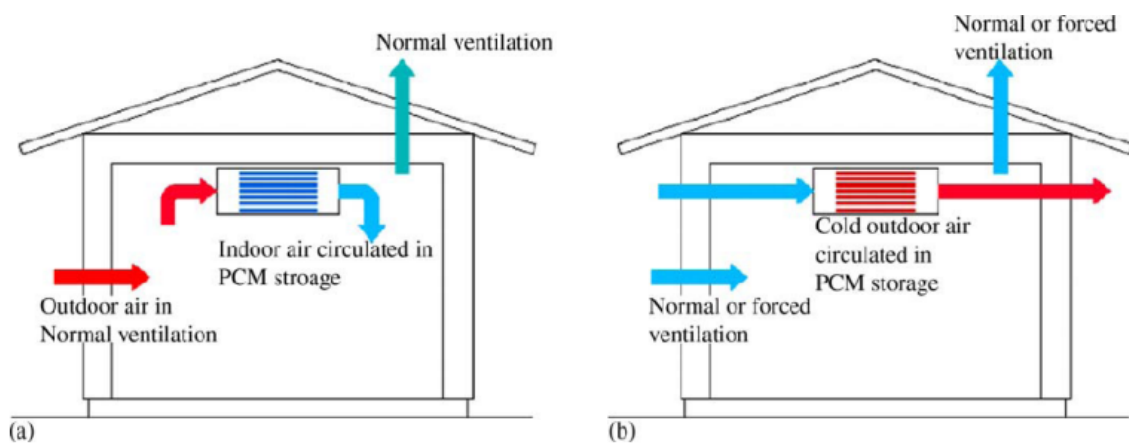
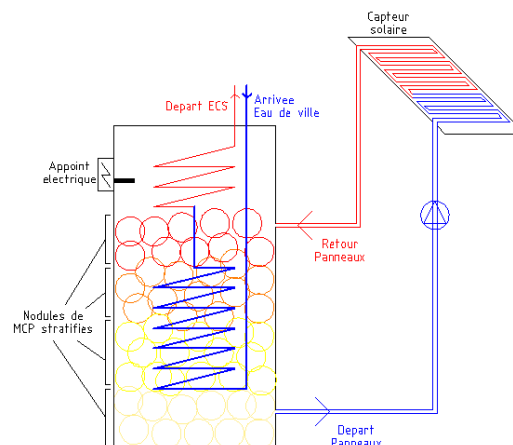


Figure 35 : Schéma de principe du fonctionnement de l'échangeur la nuit (b) et en journée (a) (37)

Parmi les intégrations actives, on note aussi une utilisation dans le stockage solaire thermique. En effet, les ballons ECS solaires classiques présentent généralement une absence de stratification avec une température de l'eau qui a tendance à être homogène. Si la température du ballon devient trop basse en raison de cette homogénéisation, cette eau ne peut pas servir aux réseaux ECS. L'ajout de MCP permet de créer des couches stratifiées et éviter une homogénéisation de la température, comme le montre le schéma ci-dessous. Lorsque l'occupant puise de l'eau ponctuellement, la température haute du ballon chute. Si l'occupant puise de l'eau de manière prolongée, les MCP se solidifieront et cèderont leur énergie à l'eau en vue de la réchauffer. Cette stratification permet ainsi d'éviter une température d'eau homogène, trop faible pour être utilisée dans le réseau ECS.

Figure 36 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à stratification (38)



2.5.3 Présentation de quelques matériaux commercialisés

Pour conclure cette partie sur les MCP, nous proposons ci-dessous un panorama de quelques matériaux de construction intégrant des MCP, fabriqués par quatre entreprises : BASF, Rubitherm, WINCO Technologies et DuPont De Nemours.

Micronal de BASF

Le produit MICRONAL[®] PCM est un MCP fabriqué par BASF et intégré dans les matériaux de construction, notamment dans les enduits intérieurs avec un dosage d'environ 30% de PCM. Disponible sous forme liquide ou en poudre, le produit est microencapsulé. Les capsules, en polymère, contiennent la cire.

BASF vend plusieurs typologies de produits contenant ce MCP. MICRONAL[®] PCM est intégré à des blocs de béton cellulaire mais aussi dans des enduits à base de plâtre. Enfin, il est également vendu sous forme de panneaux de plâtre dans lequel est incorporé le matériau à changement de phase (dont la température de fusion peut être de 23°C ou 26°C) avec les caractéristiques suivantes (39,40) :

- Longueur : 2,00 m
- Largeur : 1,25 m
- Epaisseur : 15 mm
- Poids : 11,5 kg/m²
- Taux de PCM : ca. 3 kg sec/m²
- Capacité de chaleur latente : ca. 330 kJ/m²
- Prix : 35 HT €/m²

Concernant l'accumulation de chaleur, le panneau est comparable à un mur en béton de 9 cm et à un mur de 12 cm de briques.

Paramètre/critère	Micronal [®] PCM SmartBoard™ 23	Micronal [®] PCM SmartBoard™ 26	à titre de comparaison : plaque de plâtre standard
Température de changement de phase	23 °C	26 °C	–
Capacité de chaleur latente ΔH dans la plage de changement de phase	env. 330 kJ/m ²	env. 330 kJ/m ²	0 kJ/m ²
Capacité calorifique spécifique	env. 1,20 kJ/kgK	env. 1,20 kJ/kgK	env. 0,85 kJ/kgK
Conductivité thermique λ ³	env. 0,134 W/mK	env. 0,134 W/mK	env. 0,19 W/mK



Figure 37 : Illustration et caractéristiques thermiques du produit MICRONAL[®] PCM (39)

Rubitherm

L'entreprise produit et commercialise Rubitherm RT, un MCP disponible sur des températures de fusion allant de -10°C à 90°C.

Par exemple, le MCP « RT28HC » présente les caractéristiques suivantes (41) :

- Plage de fusion : 27 à 29 °C (pic à 28°C)
- Plage de solidification : 29°C à 27 °C (pic à 27°C)
- Chaleur latente massique : 250 kJ/kg
- Densité (état solide à 15°C) : 0,88 kg/l
- Densité (état liquide à 40°C) : 0,77 kg/l
- Conductivité thermique : 0,2 W/(m.K)
- Dilatation volumique : 12,5 %
- Température maximale conseillée : 50°C

WINCO Technologies

Enerciel est un enduit thermorégulant s'appliquant sur les parois intérieures de la pièce. Le produit contient 50% de cire uniquement végétale, microencapsulée, de chaleur latente égale à 184 kJ/kg. La cire végétale microencapsulée est produite par l'entreprise MCI Technologies. Plusieurs températures de fusion existent : Enerciel 23, Enerciel 26, Enerciel 28 ou encore Enerciel 29 (le chiffre correspondant à la température de fusion du MCP) (42). Concernant le prix de l'enduit, il faut compter 100 € HT/m² (pose de trois couches de 3 mm d'épaisseur, soit 9 mm) ou 20 € HT/kg d'enduit. Ces prix ne comprennent pas la pose.

WINCO Technologies commercialise également sa gamme de produits INERTEK, des microcapsules de 5 à 25 µm (disponible en poudre ou sous forme liquide), qui s'intègrent aux enduits, aux plaques de plâtre ou encore aux isolants.

Produit		Plage de changement d'état		Chaleur latente
		Fusion	Solidification	
INERTEK 5	Slurry	4 - 6 °C	1 - (-3) °C	210 J/g
	Poudre	5 - 6 °C	0 - (-2) °C	175 J/g
INERTEK 21	Slurry	20 - 22 °C	21 - 18 °C	125 J/g
	Poudre	20 - 22 °C	21 - 18 °C	110 J/g
INERTEK 23	Slurry	23 - 27 °C	23 - 18 °C	180 J/g
	Poudre	23 - 27 °C	23 - 18 °C	160 J/g
INERTEK 26	Slurry	26 - 28 °C	26 - 24 °C	200 J/g
	Poudre	26 - 28 °C	26 - 24 °C	175 J/g

Figure 38 : Propriétés de la gamme de produits Inertek (43)

DuPont de Nemours

Les panneaux Energain de la société DuPont de Nemours sont composés à 60% de paraffine et 40% de copolymère. Ce mélange est ensuite intégré entre deux feuilles d'aluminium dont l'épaisseur totale est d'environ 5 mm. Ses caractéristiques sont les suivantes (44):

- Conductivité solide : 0,18 W/(m.K)

- Conductivité liquide : 0,14
- Chaleur latente : > 70 kJ/kg
- Chaleur totale (de 14°C à 30°C) : > 170 kJ/kg
- Point de fusion : 21,7 °C
- Prix (public) : 50€ HT/m²

Le panneau est chimiquement inerte et est conçu pour avoir une longévité équivalente à celle du bâtiment. Il est de classe 1 quant à la propagation de flammes et est de classe E quant à sa réaction au feu. Le point d'inflammabilité de la paraffine selon le test d'inflammabilité ASTM D56 met en avant une température de 148 °C.



Figure 39 : Vue transversale d'un panneau Energain (44)

Enfin, l'avantage d'un tel matériau est sa stabilité dans le temps. Le CSTB a réalisé une étude sur le vieillissement d'un panneau Energain. Il en ressort que les températures de changement d'état demeurent inchangées après plus de 800 cycles, la chaleur latente a diminué de 2%, la conductivité thermique est stable à 5% sur 1000 cycles. Globalement, d'après cette étude, le matériau reste stable, au minimum, sur 1000 cycles. (45).

Parmi les fabricants non présentés, on retrouve également d'autres fabricants tels que Climator, Mitsubishi Chemical Corporation ou encore Cristopia Energy Systems.

3 Etude de l'influence des MCP sur le confort estival et les consommations énergétiques : applications sur un cas d'étude

3.1 Contexte de la mission alimentant notre cas d'étude

Afin d'étudier l'impact des MCP sur le confort estival pour les occupants ainsi que sur les consommations énergétiques, nous avons choisi un cas d'étude dans le cadre d'une commande de la section immobilière du Ministère de la Justice pour l'Ecole Nationale des Greffes à Dijon. Ce dernier a pour souhait d'engager des audits énergétiques et de confort estival en lien avec le contexte présenté en partie 1, qui peut se résumer en trois points :

1. Le contexte réglementaire, avec la mise en place du décret tertiaire qui impose une réduction des consommations énergétiques des bâtiments existants pour les maitres d'ouvrage
2. Les coûts énergétiques en augmentation induisant des factures énergétiques importantes
3. Le réchauffement climatique, avec des températures qui deviennent de plus en plus élevées en été et des enjeux concernant le maintien du confort pour les occupants pendant la période estivale.

Dans le cadre de cette mission, l'objectif est ainsi de réaliser une analyse de l'état existant afin d'identifier les gisements d'économies d'énergie possibles et de proposer dès lors des solutions d'amélioration. La mission a donc pour vocation d'orienter le maitre d'ouvrage sur les actions à mettre en œuvre pour diminuer ses consommations énergétiques et se conformer aux obligations réglementaires. Dans le même temps, il s'agit de mettre en évidence l'inconfort estival dans les pièces les plus défavorables du site afin de proposer des solutions techniques pour améliorer ce confort d'été. Le bilan du ressenti des occupants est proposé en annexe 2.

Après une présentation globale du site (usages, consommations, déperditions...), nous focaliserons notre étude uniquement sur le bâtiment B, afin d'avoir une meilleure clarté concernant les résultats obtenus et de ne pas avoir des temps de calculs trop longs lors des simulations.

3.2 Présentation du cas d'étude dans sa globalité

3.2.1 Présentation générale

Le site étudié correspond ainsi à l'Ecole Nationale des Greffes (ENG) de Dijon, rattaché au Ministère de la Justice. Il comprend au total 6 bâtiments notés B, C, D, E, F et G et mêle plusieurs typologies d'usage : hébergement, enseignement, bureaux, crèche, restauration... Le bâtiment A n'appartenant plus au maitre d'ouvrage, il est exclu du périmètre d'étude. Le plan de masse et la photographie 3D ci-dessous présentent l'ensemble de ces bâtiments et leur disposition.

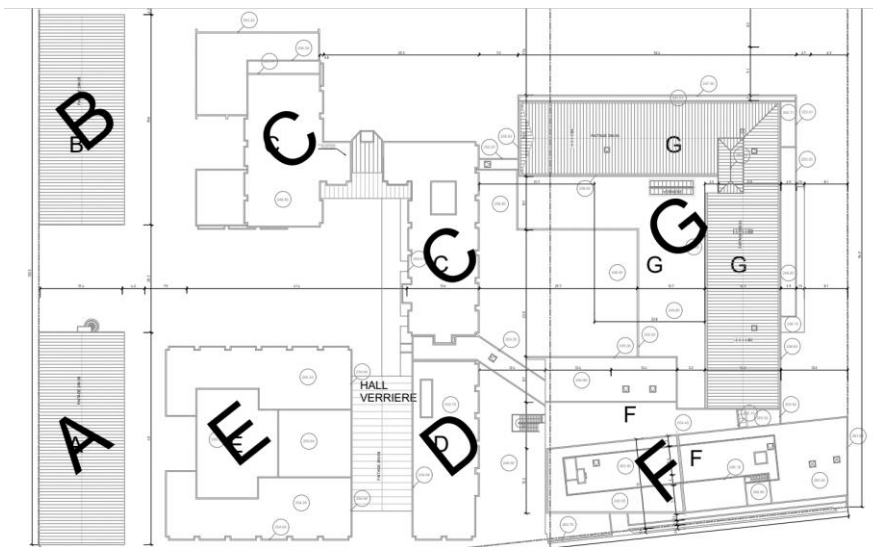


Figure 40 : Photographie 3D (46) et plan de masse du site

3.2.2 Présentation succincte des bâtiments composant le site

Comme évoqué précédemment, le site regroupe une grande diversité d’usages selon les bâtiments avec des SDP (Surface De Plancher) assez hétérogènes. De plus, tous les bâtiments n’ont pas été construits à la même époque. Le bâtiment B, autrefois une caserne militaire, date du XIXème siècle tandis que les bâtiments F et G ont été construits assez récemment, en 2007. Dans son effectif maximum, le site accueille 63000 nuitées à l’année et 130 ETP (Emploi Temps Plein). Pour conclure, le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de chaque bâtiment.

Bâtiment	Année de Construction	Niveaux	SDP étudiée	Usages
B	Avant 1940	4	2225	Hébergement Crèche Bureaux

C	1979 -1980	4 + sous-sol	5182	Hébergement Etablissement d'enseignement
D	1979 -1980	2 + sous-sol	1387	Bureaux
E	1979 -1980	2 + sous-sol	2682	Etablissement d'enseignement Bureaux
F	2007	5 + sous-sol	5022	Bureaux
G	2007	4 + sous-sol	6289	Cuisine Réfectoire Hébergement

Tableau 7 : Principales caractéristiques de chaque bâtiment

3.2.3 Les consommations énergétiques du site

Concernant les usages énergétiques du site, la production de chauffage et d'ECS sont pour la quasi-totalité assurée par le RCU (Réseau de Chaleur Urbain) de Dijon Energies. Une faible partie des besoins en chauffage et en ECS sont assurés par l'énergie électrique, cette dernière étant principalement utilisée pour les auxiliaires (pompes, ventilation, ...), l'éclairage et les usages spécifiques. Enfin, le gaz naturel est utilisé dans les cuisines. L'évolution et l'analyse des consommations d'électricité et de RCU sont présentées ci-dessous.

Consommations énergétiques réelles		2020	2021	2022	Moyenne classique	Ratio kWhEF/m ² SDP
Électricité	Consommations (kWh)	1 242 719	1 215 962	1 344 556	1 267 746	51.2
	Emissions de CO2 (kg _{éq-co2})	104 388	102 141	112 943	106 491	
	Dépenses (€ ^{TTC})	163 052	140 042	117 605	140 233	
	Coût unitaire (€ ^{TTC} /kWh)	-	-	-	-	

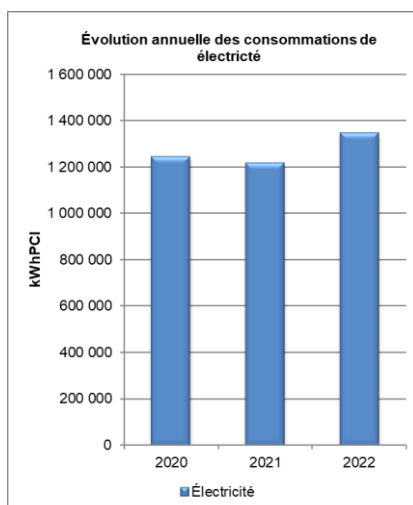


Figure 41 : Evolution des consommations en électricité à l'échelle du site

L'analyse, réalisée sur les années 2020, 2021 et 2022, met en évidence une croissance de la consommation d'électricité attribuable très probablement à une hausse de l'utilisation du bâtiment (1 215 962 kWh en 2021 et 1 344 556 kWh en 2022). De plus, il faut souligner que les années 2020 et 2021 ont été impacté par la pandémie de COVID-19, entraînant une baisse des activités sociales et économiques et donc une réduction de la consommation d'énergie. D'une manière plus fine, les consommations mensuelles montrent un pic de consommations en période estivale avec l'utilisation de la climatisation. La consommation du site est ainsi la plus élevée au mois de juillet en raison d'une occupation importante et de températures extérieures élevées tandis que les consommations du mois d'août sont réduites en raison des vacances. Le reste de l'année, les consommations restent stables.

Consommations énergétiques réelles		2020	2021	2022	Moyenne classique	Moyenne corrigée DJU	Ratio kWhEF/m ² SDP
RCU	Consommations (kWh)	2 401 000	2 732 800	2 401 200	2 511 667	2 733 753	110.3
	Emissions de CO2 (kg _{éq-co2})	132 055	150 304	132 066	138 142	150 356	
	Dépenses (€ ^{TTC})	157 908	221 009	367 425	248 780	273 475	
	Coût unitaire (€ ^{TTC} /kWh)	-	-	-	-	-	

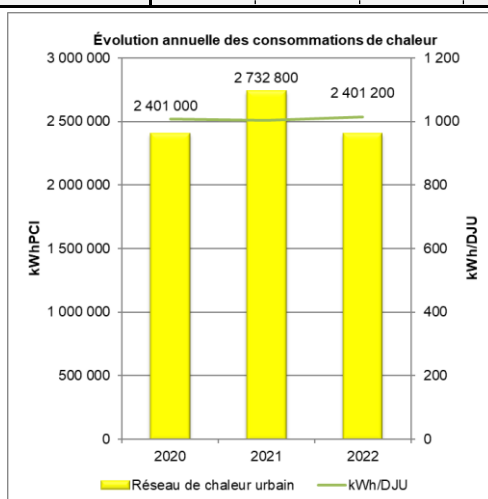
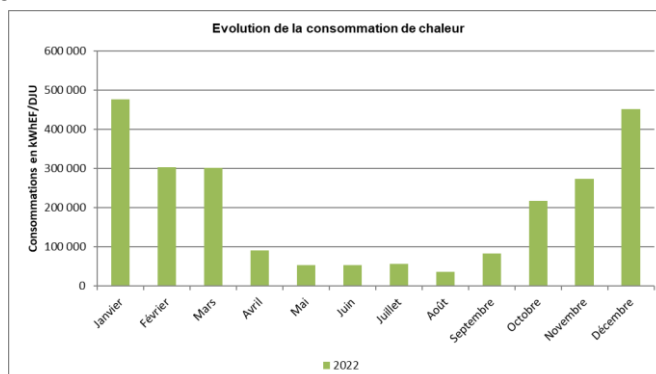


Figure 42 : Evolution des consommations en RCU à l'échelle du site

L'analyse, réalisée sur les années 2020, 2021 et 2022, et corrigée selon les DJU, met en évidence une consommation de chaleur relativement constante avec une moyenne corrigée à 2 733 753 kWh. L'étude plus fine de l'année 2022 en période estivale permet de déterminer la consommation d'énergie utilisée pour la production d'ECS, environ 40 000 kWh.

Figure 43 : Evolution mensuelle de la consommation de chaleur à l'échelle du site



L'état des lieux du bâtiment, réalisé lors de la visite de site (fin mai – début juin 2023) a permis de relever les éléments constituant le bâti mais également les systèmes assurant les usages des bâtiments. Cet état des lieux a ensuite permis de modéliser le site sur le logiciel Pleiades+Comfie.

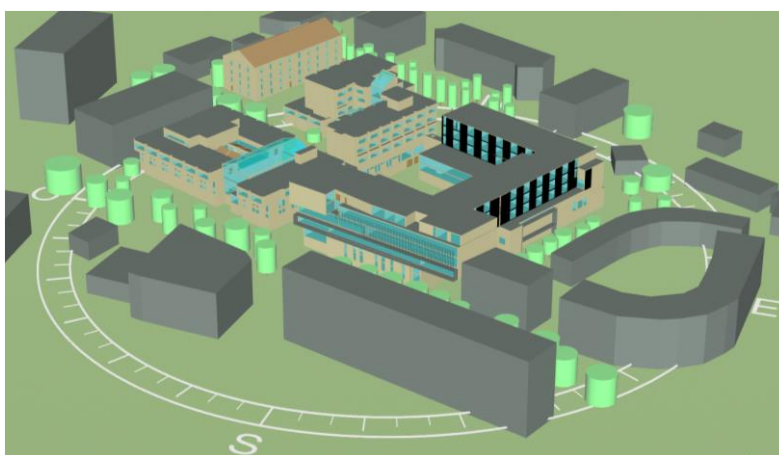


Figure 44 : Vue 3D de la modélisation du site sur le logiciel Pleiades+Comfie

3.2.4 Etude des déperditions

Dans un premier temps, une étude des déperditions, réalisée pour une température intérieure de 19°C et pour une température extérieure de -10°C a permis d'identifier les pertes des différents éléments constituant le bâti.

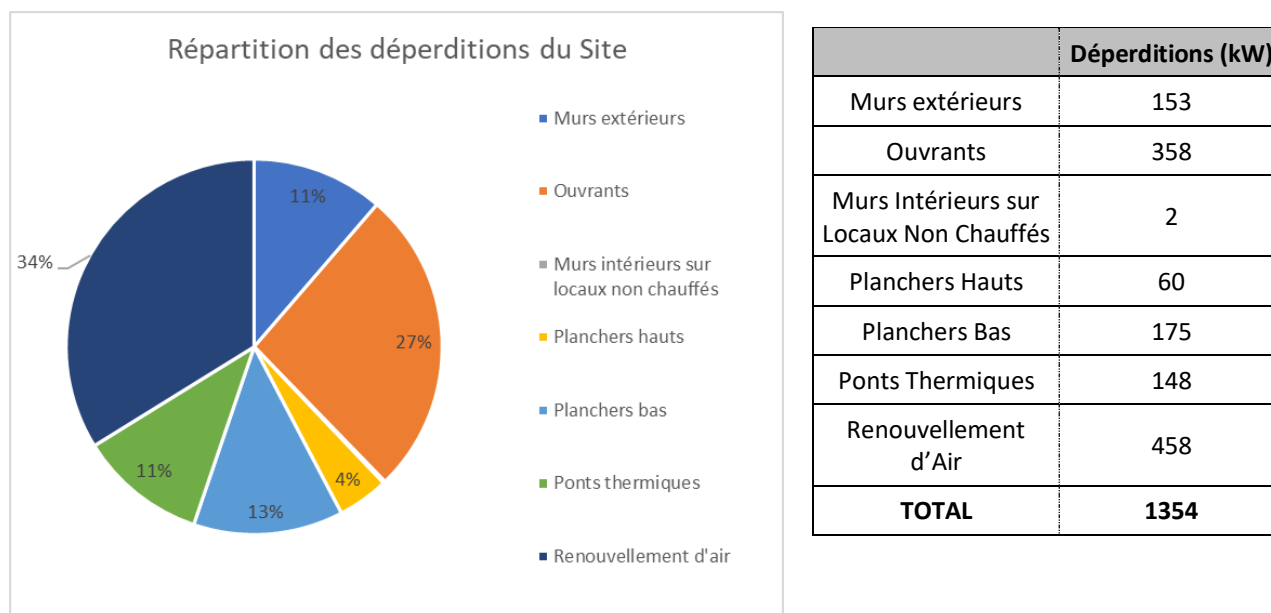
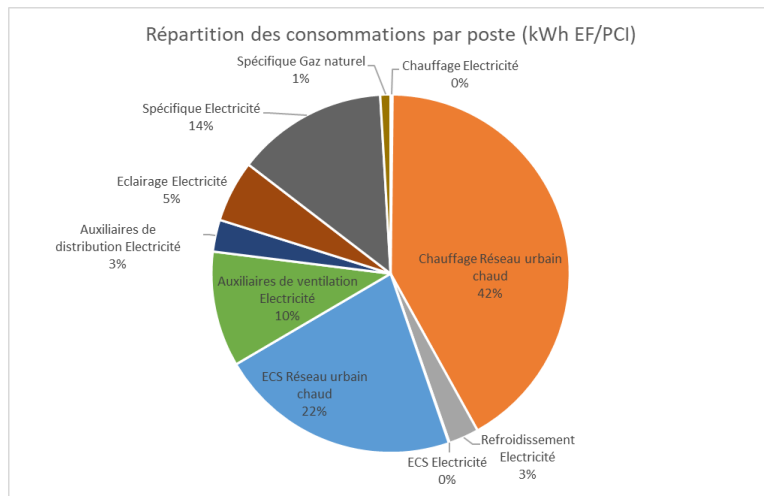


Figure 45 : Déperditions à l'échelle du site

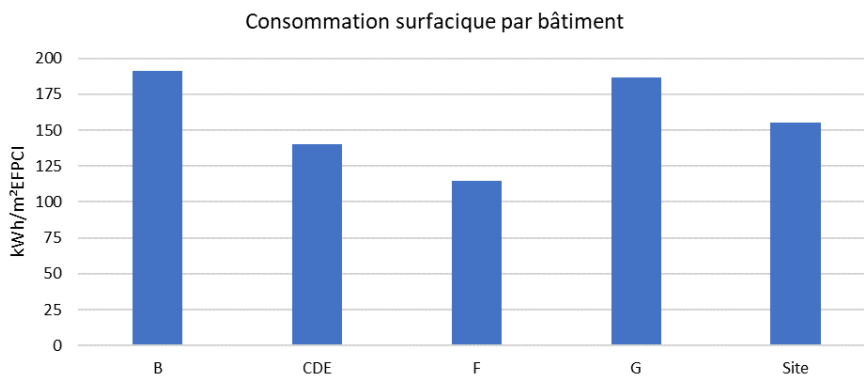
Cette étude met en évidence que le renouvellement d'air est responsable du tiers des déperditions (34%), devant les ouvrants (27%), et les planchers bas (13%). Ceci s'explique par l'ouverture des fenêtres et les infiltrations d'air mais également par une faible efficacité ainsi que des problèmes d'étanchéités des menuiseries, la majorité étant d'origine.

3.2.5 Etude de la répartition énergétique par poste et par bâtiment



Dans un second temps, la modélisation permet d'obtenir la répartition des consommations par poste. On remarque ainsi que le chauffage représente la part la plus importante des consommations (avec 42%), devant l'ECS (22%).

Figure 46 : Diagramme des consommations par poste (kWh EF/PCI)



A l'échelle du site, le bâtiment B est celui qui consomme le plus au m², juste devant le bâtiment G. Malgré le fait que ces bâtiments aient une enveloppe plus performante que les bâtiments CDE ou F, ceci s'explique par les usages qu'ils abritent, c'est-à-dire essentiellement des logements (et une crèche pour le bâtiment B).

Figure 47 : Graphique représentant la consommation surfacique par bâtiment

3.2.6 Calage du modèle sur logiciel

Une fois que le modèle est configuré (compositions des parois, menuiseries, scénarios, ...), le modèle est calé grâce aux consommations d'énergie présentées précédemment. Dans notre cas, le calage du modèle a été réalisé selon les consommations de 2022 avec un écart entre les consommations réelles issues des factures et les consommations simulées inférieur à $\pm 5\%$. Le tableau ci-dessous récapitule ces écarts pour la consommation de gaz naturel et d'électricité. Par ailleurs, le calage a été réalisé dans un premier temps à l'échelle du site puis par bâtiment (ou groupe de bâtiments) suivant les données disponibles (chauffage et/ou ECS).

	Réelles	Théoriques (corrigées de la rigueur climatique - Moyenne classique)	Ecart
B - Consommations - RCU (Chauffage + ECS) (kWHEF PCI)	334 260	350 356	5%
CDE - Consommations - RCU (Chauffage) (kWHEF PCI)	712 700	742 415	4%
FG - Consommations - RCU (Chauffage) (kWHEF PCI)	661 100	690 422	4%
CG + cuisine - Consommations - RCU (ECS) (kWHEF PCI)	692 940	662 717	-4%
Consommations - Electricité (kWHEF PCI)	1 344 556	1 364 531	1%
Consommations - Gaz - kWheF PCI	35 803	35 803	0%
Consommations totales (kWheF)	3 781 359	3 846 244	2%

Tableau 8 : Ecart entre les consommations réelles et modélisées (théoriques)

3.3 Présentation spécifique du bâtiment B

3.3.1 Etat des lieux : situation initiale modélisée

Maintenant que nous avons présenté d'une manière globale le site, nous allons nous concentrer sur le bâtiment B afin de réaliser notre étude sur l'influence des MCP.

D'un point de vue des déperditions, le renouvellement d'air représente 38% des déperditions, suivi par les ponts thermiques (22%), les murs extérieurs (14%) et les ouvrants (18%). Concernant les consommations d'énergie par poste, le chauffage (RCU) représente 41% des consommations totales du bâtiment et la production d'ECS représente 42%.

Comme évoqué précédemment, l'état des lieux permet de définir l'état initial du bâtiment. Avant d'étudier l'influence des MCP sur le bâtiment, il s'agit de présenter les caractéristiques du bâtiment B. L'étude du confort estival se faisant sans les systèmes (de chauffage, de climatisation, ...), ceux-ci seront uniquement précisés en annexe 3 du rapport. Chaque élément constitutif du bâti est décrit brièvement ci-dessous et une notation concernant sa performance et sa vétusté est réalisée avec une échelle de 0 à 4.

3.3.1.1 Bâti

Echelle de notation performance et vétusté				
Performance	0 Très peu performant	1 Peu performant	2 Performant	3 Très performant
Vétusté	0 A remplacer	1 Etat d'usage	2 Bon état	3 Etat neuf

Enveloppe - bâti				
Elément d'enveloppe	Localisations	Description	Perf.	Vét.
Murs extérieurs	Ensemble du bâtiment	Mur sur extérieur : Mur en pierre de 45cm isolée par l'intérieur avec 10 cm de PSE (Polystyrène expansé)	2	2
	Chaufferie	Mur sur local non chauffé : Mur en béton sans isolation	0	1

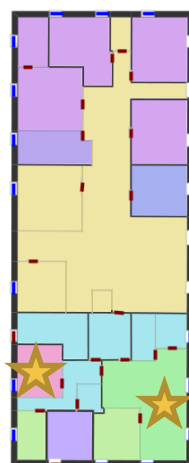
Menuiseries extérieures	Ensemble de menuiseries hors menuiseries donnant sur les escaliers extérieurs	Menuiseries DV PVC 4/18/4	3	2
	Menuiserie donnant sur les escaliers extérieurs et porte principale donnant sur la cour	Menuiseries DV Alu 6/12/6	3	2
	Porte sur Av. Aristide Briand	Porte Bois Pleine	1	1
Planchers hauts	Combles	Laine de verre 26 cm (R = 6,5 m ² K/W)	3	2
Planchers bas sur terre-plein	Ensemble du bâtiment	Dalle béton 20 cm (Hypothèse)	1	1

Tableau 9 : Caractéristiques du bâti

Plus précisément, les menuiseries installées dans les pièces d'études, de type 4/18/4, ont pour performances : $U_w = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $S_w = 0,40$; $T_{Lw} = 0,55$

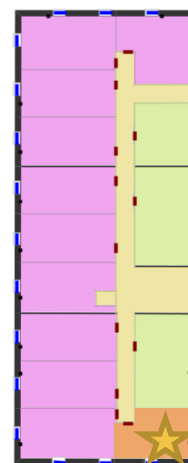
3.3.1.2 Zonage thermique

Dans le cadre de l'étude de l'inconfort estival, seules certaines pièces ont été choisies pour leur représentativité du bâtiment. Ainsi, au RDC, le dortoir représente l'ensemble de la crèche orientée nord, tandis que la salle de jeux représente l'ensemble de la crèche orientée côté sud. Concernant les logements, le logement orienté au Sud/Est au R+2, sera représentatif de l'ensemble des logements en raison de sa disposition défavorable pour le confort d'été. Les plans ci-dessous permettent de localiser les pièces étudiées.



Plan RDC

Bâtiment B – Dortoir



Plan R+2

Bâtiment B - Logement Façade Sud/Est R+2

Bâtiment B - Salle d'activité (de jeux)

Figure 48 : Localisation des pièces étudiées dans le cadre de l'étude

3.3.1.3 Chauffage

L'étude de confort d'été porte sur le confort thermique des occupants, dès lors, le système de chauffage est exclu du périmètre d'analyse. En revanche, les scénarios actuels de chauffage ont été intégrés à la modélisation pour éviter des problèmes de températures intérieures à la mi-saison. Le programme horaire pour chaque typologie de pièce est présenté ci-dessous.

Programme horaire			
Départ	T _{confort}	Horaires Confort	T _{réduit}
Studios (Logement)	19°C	Du lundi au vendredi de 6h à 22h Le week-end pendant 24h	17°C
Crèche	20 °C	Du lundi au vendredi de 6h à 19h	19°C

Tableau 10 : Programme horaire des systèmes de chauffage pour les pièces étudiées

3.3.1.4 Climatisation

Actuellement, la salle de jeux est climatisée. Néanmoins, l'objectif de l'étude est de limiter le recours aux solutions actives de climatisation. Ainsi, le climatiseur ne sera pas considéré dans la suite de l'étude.

3.3.1.5 Renouvellement d'air

Concernant le renouvellement d'air, une ventilation Double Flux (DF) est installée dans la crèche. Dans les logements, la ventilation est assurée par un extracteur Simple Flux (SF). Les débits utilisés pour la modélisation sont résumés ci-dessous.

Zones	Système	Débit nominal	Planning
Bat B – Dortoirs (Crèche)	Ventilation DF Bouches d'extraction et de soufflage	Soufflage : 75 m³/h Extraction : 75 m³/h (Hypothèse : 15 m ³ /occ)	Permanent
Bat B – Salle de jeux (Crèche)	Ventilation DF Bouches d'extraction et de soufflage	Soufflage : 375 m³/h Extraction : 375 m³/h (Hypothèse : 18 m ³ /occ)	Permanent
Bat B – Logement Façade Sud/Est R+2 (Ensemble des logements)	Bouches d'extraction	35 m³/h/studio	Permanent
Bat B – Logement Façade Sud/Est R+2 (Ensemble des logements)	Entrées d'air sur menuiseries	35 m³/h/studio	Permanent

Tableau 11 : Caractéristiques du renouvellement d'air mécanique

3.3.1.6 Etanchéité à l'air

L'étanchéité à l'air pour l'état existant du bâtiment B a été prise à 1,7 m³/(h.m²) sous 4 Pa. Cette valeur quantifie l'air qui entre et sort de manière parasite dans le bâtiment.

3.3.1.7 Occupation

Les apports liés aux occupants des logements ont été fixés à 80W/occupants (uniquement la chaleur sensible). En ce qui concerne la crèche, ils ont été fixés à 60W/occupants (valeur pour des enfants ayant une activité physique moyenne).

Zones	Planning hebdomadaire	Planning annuel
Bat B – Dortoirs (Crèche)	Nom	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
	Lundi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 5 0 5 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	Mardi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 5 0 5 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	Mercredi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 5 0 5 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	Jeudi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 5 0 5 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	Vendredi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 5 0 5 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	Samedi	0 0
	Diamanche	0 0
Bat B – Salle de jeux (Crèche)	Nom	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
	Lundi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 20 10 10 20 5 5 20 20 10 0 0 0 0 0
	Mardi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 20 10 10 20 5 5 20 20 0 0 0 0 0 0
	Mercredi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 20 10 10 20 5 5 20 20 0 0 0 0 0 0
	Jeudi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 20 10 10 20 5 5 20 20 0 0 0 0 0 0
	Vendredi	0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 20 10 10 20 5 5 20 20 0 0 0 0 0 0
	Samedi	0 0
	Diamanche	0 0
Bat B – Logement Façade Sud/Est R+2 1 occ/chambre (0,029 occ/m ²)	Nom	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
	Lundi	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1
	Mardi	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1
	Mercredi	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1
	Jeudi	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1
	Vendredi	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1
	Samedi	1 1
	Diamanche	1 1

Tableau 12 : Caractéristiques de l'occupation

3.3.1.8 Eclairage

Les pièces étudiées sont équipées de systèmes d'éclairage artificiel performants (LED et basse consommation). Cet éclairage artificiel est dépendant de la lumière naturelle et de l'occupation.

Zones	Eclairage	Planning
Bat B – Dortoirs (Crèche)	4 pavés LED 9 W/m ²	0 Lux
Bat B – Salle de jeux (Crèche)	11 pavés LED 8,5 W/m ²	500 Lux en période d'occupation 0 Lux sinon
Bat B – Logement Façade Sud/Est R+2 (Ensemble des logements)	Ampoules basse consommation 1,4 W/m ²	200 Lux Du lundi au vendredi entre 7h et 9h ; 12h et 14h et 19h et 22h Le week-end de 7h à 22h

Tableau 13 : Caractéristiques concernant l'éclairage

3.3.1.9 Puissance dissipée

A l'exception des logements, le dortoir et la salle de jeux ne présentent pas d'équipements spécifiques.

Zones	Planning hebdomadaire	Planning annuel																																																		
Bat B – Dortoirs (Crèche)	-	-																																																		
Bat B – Salle de jeux (Crèche)	-	-																																																		
Bat B – Logement Façade Sud/Est R+2	<p>Valeur de base : 2W/m² Planning (en % de la valeur de base)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nom</th> <th>0</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> <th>14</th> <th>15</th> <th>16</th> <th>17</th> <th>18</th> <th>19</th> <th>20</th> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LMMJVSD</td> <td>77</td> <td>63</td> <td>54</td> <td>46</td> <td>44</td> <td>47</td> <td>60</td> <td>88</td> <td>89</td> <td>97</td> <td>110</td> <td>160</td> <td>170</td> <td>100</td> <td>90</td> <td>79</td> <td>75</td> <td>93</td> <td>119</td> <td>179</td> <td>169</td> <td>150</td> <td>135</td> <td>107</td> </tr> </tbody> </table> <p>Frigo, plaque cuisson, ...</p>	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	LMMJVSD	77	63	54	46	44	47	60	88	89	97	110	160	170	100	90	79	75	93	119	179	169	150	135	107	Toute l'année (à l'exception du 8 au 31 août)
Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23																												
LMMJVSD	77	63	54	46	44	47	60	88	89	97	110	160	170	100	90	79	75	93	119	179	169	150	135	107																												

Tableau 14 : Caractéristiques des équipements

3.3.1.10 Dispositifs d'occultation

La performance finale des dispositifs d'occultation dépend de la performance intrinsèque de la protection utilisée (volets roulants, brise soleil orientables, stores intérieurs, ...) mais également de la pertinence de l'utilisation de la protection par l'utilisateur. Ces deux facteurs sont essentiels dans la performance finale de l'occultation. L'ensemble du bâtiment B est ici équipé de stores/rideaux intérieurs dont les différentes performances sont présentées ci-dessous. Un taux de foisonnement de 70% a été appliqué avec une utilisation de 8h à 22h.

Dispositif d'occultation	Stores ou rideaux intérieurs
Performance intrinsèque	10%
Taux d'utilisation de 8h à 22h	70%
Performance totale	7%

Tableau 15 : Caractéristiques des dispositifs d'occultation

3.3.1.11 Aération

Concernant l'ouverture des menuiseries, ces dernières sont considérées ouvrantes selon l'algorithme d'ouverture définie par les règles Th-BCE. Ainsi, l'ouverture est considérée uniquement en période d'occupation et lorsque la température intérieure dépasse les 25°C. L'ouverture est modulée en fonction de la température extérieure et de son écart avec la température intérieure.

	Saison de chauffage (hiv) ou Saison mixte	Mi-saison (mis)	Saison de refroidissement (été)
$\Delta\theta_{op_1_man}$	3°C	3°C	3°C
$\Delta\theta_{op_2_man}$	1°C	1°C	1°C
$\theta_{op_base_man}$	26°C	24°C	22°C
$d\theta_{ext_int_man}$	-6°C	-6°C	-6°C
$\theta_{ei_seuil_bas_man}$	12°C	10°C	8°C
$\theta_{ei_seuil_haut_man}$	18°C	18°C	16°C

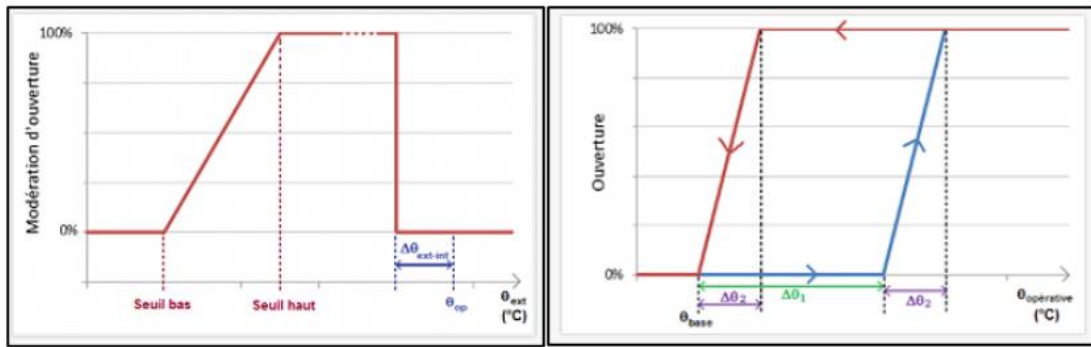


Figure 49 : Algorithme d'ouverture issu des règles Th-BCE

En fonction du type d'ouverture de menuiserie, du type d'occultation et de l'utilisation de l'occultation, un ratio d'ouverture maximal a été défini. Le tableau ci-dessous résume ces caractéristiques :

Type d'ouverture	Française	Coulissante
Ratio d'ouverture maximal	80%	40%
Dispositif d'occultation	Protections intérieures	Protections intérieures
Taux d'utilisation	70%	70%
Ratio d'ouverture finale	28%	14%

Tableau 16 : Caractéristiques des ouvertures des menuiseries

3.3.1.12 Fichier Météo

Afin d'étudier le confort d'été, le fichier météo utilisé est celui de la station météo de Dijon, qui se situe à 7 kilomètres du lieu de notre cas d'étude. Le fichier météo est de type « caniculaire » et inclut les effets du réchauffement climatique suivant le scénario RCP 4.5 du GIEC pour 2070. La semaine identifiée comme étant la plus chaude est celle du 23/07 au 30/07.

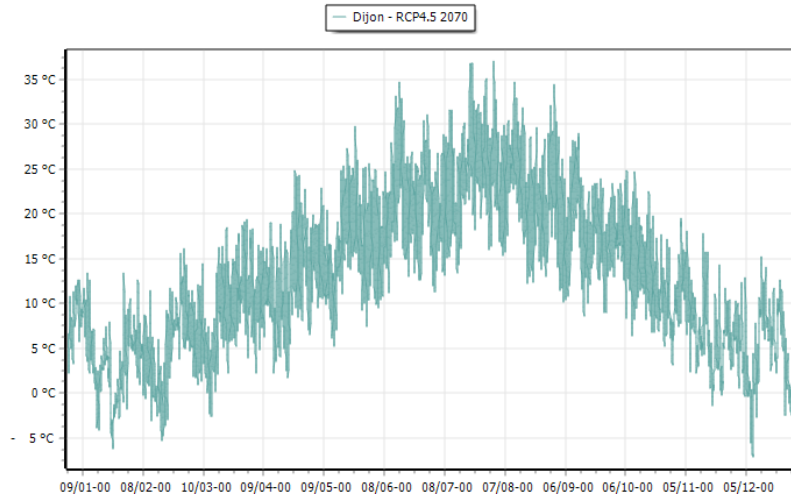


Figure 50 : Courbe annuelle de la température extérieure (Dijon - RCP4.5 2070)

3.3.2 Analyse de l'état initial

3.3.2.1 Ombres portées et insolation des façades

L'ensemble de ces informations permet ainsi de simuler l'état initial pour nos pièces étudiées. L'étude des ombres portées met en évidence que les arbres de la rue à proximité du bâtiment B masquent la partie inférieure (RDC et R+1) du bâtiment. De plus, l'étude de l'insolation des façades (en nombres d'heures annuelles d'exposition) permet de confirmer, comme pressenti, que les pièces orientées Sud-Est sont potentiellement les zones les plus favorables à la surchauffe. Dès lors, l'étude des ombres portées et de l'insolation des façades justifie le choix des pièces spécifiquement étudiées. La visualisation des ombres portées et de l'insolation des façades est disponible en annexe 4.

3.3.2.2 Bilans des apports estivaux

L'ensemble des données d'entrée précédentes permet ainsi d'obtenir les résultats de notre état initial concernant les apports estivaux et leur évolution sur la semaine la plus chaude. D'une manière générale, les apports estivaux se distinguent selon 4 catégories d'apports : solaire, éclairage artificiel, puissance dissipée et occupation.

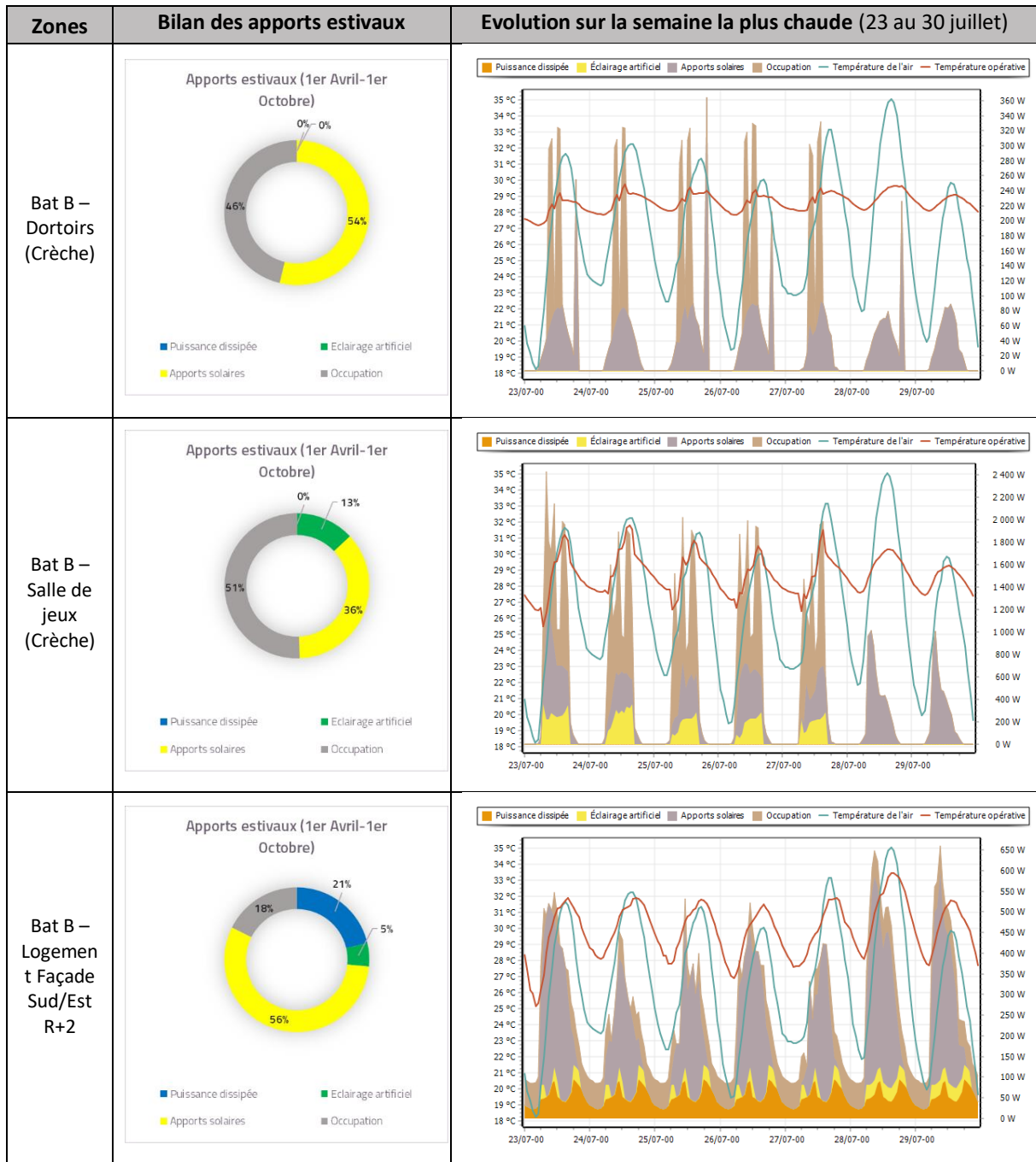


Figure 51 : Bilans des apports estivaux pour chaque pièce étudiée

Dortoir : les apports solaires représentent les apports principaux. Cependant, leur intensité reste assez modérée en raison des masques générés par les arbres de la rue environnante. Les résultats mettent en évidence que l'intensité des apports solaires est plus élevée dans l'après-midi, cela étant cohérent avec l'orientation Nord-Ouest du dortoir. En raison de son usage, le dortoir ne présente pas d'apports liés à l'éclairage et à la puissance dissipée. Sur la semaine la plus chaude, la température intérieure ne descend pas en dessous de 27°C.

Salle d'activité : les apports liés à l'occupation apparaissent très importants. De plus, en raison d'occultations peu performantes (stores intérieurs), les apports solaires représentent une partie importante des apports totaux. Malgré l'équipement de la pièce en luminaires LED, 13% des apports sont dus à l'éclairage artificiel.

Studio : L'orientation Sud-Est ainsi que l'absence de dispositifs d'occultations performants expliquent que les apports solaires représentent la source majoritaire des apports totaux. Les apports liés à la puissance dissipée et à l'éclairage artificiel (en période d'occupation, c'est-à-dire en début et fin de journée notamment) engendrent des apports supplémentaires.

3.3.3 Choix des indicateurs pour étudier le confort estival et visualisation des résultats

Afin d'étudier le confort estival selon les différentes configurations, les indicateurs suivants sont définis :

-La température maximale atteinte sur la période de simulation

-Le nombre d'heures (précisé également en pourcentage de temps) où la température opérative dépasse les 28°C pendant la période d'occupation. Le même indicateur est défini pour la température dépassant les 30°C afin de pouvoir étudier la stratification des températures suivant les solutions proposées.

-Le nombre de vagues de chaleur (fréquence annuelle), la durée moyenne d'une vague de chaleur et la durée maximale constatée sur la période de simulation. Une vague de chaleur est définie comme une période où la température opérative de la pièce dépasse les 30°C pendant au moins deux heures consécutives (toutes heures confondues, y compris hors occupation). Les programmes MATLAB utilisés pour les calculs sont en annexe 5.

-Les degrés-heures (DH), à l'échelle de l'année, qui correspondent à la somme des écarts entre la température intérieure et la température de référence (26°C la nuit et 28°C en journée de 7h à 22h). D'après la RE2020, une zone ne dépassant pas les 350 DH est considérée comme confortable. Au-delà de 1250 DH, le projet n'est pas conforme car il est jugé que l'inconfort est inacceptable.

Les indicateurs pour l'Etat Initial sont présentés ci-dessous :

ETAT INITIAL									
Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Salle de jeux - Etat Initial	167	55	6,6%	2,2%	34,2	283	19	5,4	13
Bat B - STD - Dortoir - Etat Initial	50	2	4,8%	0,2%	30,5	40	3	6,3	8
Bat B - STD - Logement - Etat Initial	415	170	6,2%	2,5%	33,7	1045	35	10,9	21

Tableau 17 : Résultats de l'Etat Initial

Il en ressort que la pièce actuelle ayant les indicateurs les plus défavorables correspond aux logements, avant la salle de jeux puis le dortoir. Le logement présente 1045 DH et 35 vagues de chaleur au total, dont la plus longue dure 21h. L'état initial du dortoir est satisfaisant avec seulement 40 DH et 2 heures d'occupation où la température dépasse les 30°C.

Concernant la visualisation des résultats, des graphiques issus du logiciel Pleiades+Comfie présenteront l'évolution des températures sur la semaine la plus chaude. De plus, nous avons défini un programme MATLAB permettant la visualisation des températures sous la forme d'une « Heat Map » (carte de chaleur). Le programme est en annexe 5.

3.4 Etudes préliminaires sur les MCP

Avant d'implémenter les MCP sur notre état initial, ces études préliminaires ont pour objectif d'identifier l'influence des caractéristiques des MCP ainsi que leur configuration sur les résultats obtenus. Pour ces études préliminaires, les pièces utilisées sont le dortoir et la salle d'activité de la crèche.

3.4.1 Influence de la température de fusion

Deux matériaux, ayant une température de fusion différente, ont été testés. Il s'agit de voir l'importance de la température de fusion (plage de fusion) dans la recherche du confort estival. En effet, la température de fusion (ou la plage de fusion suivant le MCP qui est employé) est déterminante car elle détermine à quelle(s) température(s) le matériau va stocker et libérer la chaleur dans la pièce. Les trois configurations testées sont présentées ci-dessous :

Référence – Murs sur extérieur non isolés + plancher intermédiaire classique + cloisons classiques

INT 1 – Murs sur extérieur non isolés, plancher intermédiaire et cloisons : mise en place du matériau **Enerciel 23** : température de fusion à 23°C et température de solidification à 21°C

INT 2 -Murs sur extérieurs non isolés, plancher intermédiaire et cloisons : mise en place du matériau **Enerciel 28** : température de fusion à 28°C et température de solidification à 26 °C

Le MCP est intégré côté intérieur des locaux.

La simulation donne les résultats suivants :

Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Dortoir - Référence	49	2	4,7%	0,2%	30,4	49	8	5,75	9
Bat B - STD - Dortoir INT1 - Enerciel 23	48	3	4,6%	0,3%	30,4	46	7	5,9	9
Bat B - STD - Dortoir INT2 - Enerciel 28	32	0	3,1%	0,0%	29,6	17	0	0,0	0
/									
Bat B - STD - Salle de jeux - Référence	164	54	6,4%	2,1%	33,9	277	18	7,1	15
Bat B - STD - Salle de jeux INT1 - Enerciel 23	164	52	6,4%	2,0%	34,1	280	18	6,8	14
Bat B - STD - Salle de jeux INT2 - Enerciel 28	164	51	6,4%	2,0%	33,8	254	17	4,3	12

Tableau 18 : Résultats avec deux matériaux ayant une température de fusion différente (23°C et 28°C)

Les résultats de la simulation montrent une meilleure efficacité du matériau Enerciel 28 par rapport au matériau Enerciel 23 (passage de 46 DH à 17 DH pour le dortoir). De plus, le nombre de vagues de chaleur est nul avec le matériau Enerciel 28. Concernant la salle de jeux, orientée au sud, les DH diminuent ainsi que la durée moyenne des vagues de chaleur (passage de 7,1 heures à 4,3 heures). Néanmoins, on remarque qu'il ne s'avère pas aussi efficace que dans le dortoir, orienté au nord. Les résultats passables du matériau Enerciel 23 s'expliquent par sa température de fusion qui n'est pas adaptée pour diminuer les surchauffes. En effet, durant la semaine la plus chaude, le matériau est toujours sous forme liquide et ne repasse pas sous sa forme solide la nuit, en raison d'une température intérieure trop élevée. Il n'y a donc pas ce phénomène de stockage/déstockage. L'Enerciel 28 est intéressant car, la nuit, la température est généralement inférieure à 28°C et le matériau repasse sous sa forme solide, déchargeant la quantité de chaleur accumulée durant la journée. Le graphique ci-dessous illustre cela :

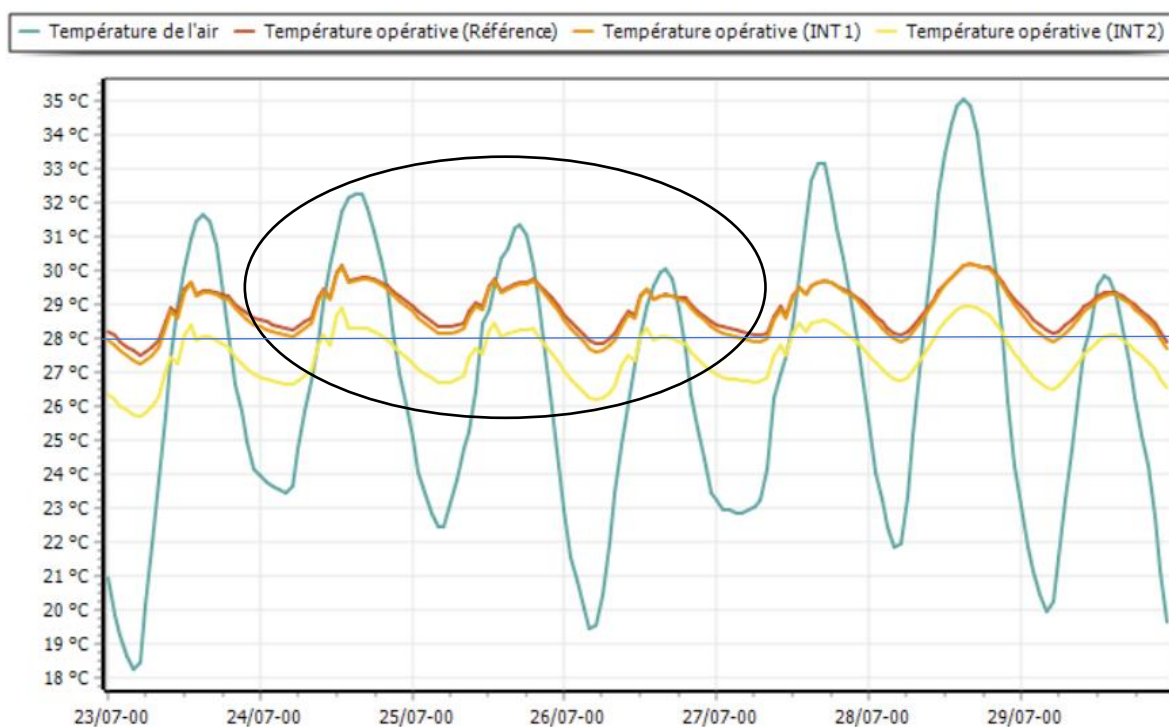


Figure 52 : Evolutions de la température pour le dortoir sur la semaine la plus chaude

Comme le montre le graphique ci-dessous, le matériau Enerciel 28 est très bien adapté pour notre cas d'étude puisque le matériau est en mesure de réaliser son cycle quotidien de fusion/solidification. En journée, la température est supérieure à 28°C (le matériau est sous sa forme liquide et absorbe la chaleur, limitant le pic de température) tandis que la nuit la température intérieure est généralement inférieure à 28°C (le matériau repasse sous sa forme solide et libère la chaleur accumulée la journée). Nous verrons par la suite que le renouvellement d'air nocturne est important afin de bien évacuer cette chaleur durant la phase nocturne.

Ainsi, cette étude confirme la nécessité de choisir correctement le matériau à changement de phase en fonction de son objectif (confort d'été, régulation de la température à la mi-saison) et de la météo locale du lieu du projet. En effet, le climat influence directement le choix du matériau. Il s'agit ainsi de

choisir la température de fusion du matériau en étudiant les fluctuations journalières des températures afin de faire en sorte que le matériau puisse réaliser son cycle (fusion/solidification). Lorsque les fluctuations journalières ne sont pas très régulières, des matériaux présentant des plages de fusion peuvent être utilisés.

3.4.2 Etude de trois produits de fabricants différents

Dans cette étude, il s'agit d'étudier trois matériaux de trois fabricants différents. Les trois configurations testées sont présentées ci-dessous :

INT 1 - Murs sur extérieurs non isolés, plancher intermédiaire et cloisons : mise en place du matériau Energain (1 cm)

INT 2 - Murs sur extérieurs non isolés, plancher intermédiaire et cloisons : mise en place du matériau Micronal BASF (1,5 cm)

INT 3 - Murs sur extérieurs non isolés, plancher intermédiaire et cloisons : mise en place du matériau Enerciel 23 (0,9 cm)

Le MCP est intégré côté intérieur des locaux.

Les caractéristiques des matériaux sont données ci-dessous. Les données proviennent des fiches techniques de fabricants et font parties des matériaux disponibles dans la bibliothèque générale de Pléiades.

Caractéristiques des matériaux	Energain (DuPont)	Micronal (BASF)	Enerciel 23 (WINCO Technologies)
Conductivité (W/(m.K))	0,18	0,18	0,15
Masse volumique (kg/m ³)	855	767	832
Chaleur spécifique (J/(kg.K))	4140	1200	2500
Chaleur spécifique (Wh/(kg.K))	1,15	0,333	0,694
Chaleur latente (kJ/kg)	71	28,7	85
Chaleur latente (kJ/m ²)	303,5	330,2	636,5
Température de fusion (°C)	21,7	23	23
Température de solidification (°C)	18	23	21
Plage de Fusion (°C)	5	5	1

Tableau 19 : Principales caractéristiques thermiques pour les trois matériaux testés

Les résultats de la simulation sont les suivants.

Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH (>28°C)	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Dortoir INT1	48	2	4,6%	0,2%	30,4	44	8	5,0	9
Bat B - STD - Dortoir INT2	48	3	4,6%	0,3%	30,8	46	7	5,9	9
Bat B - STD - Dortoir INT3	48	3	4,6%	0,3%	30,4	46	5	5,6	9
/									
Bat B - STD - Salle de jeux INT1	162	52	6,4%	2,0%	34,0	274	19	6,5	14
Bat B - STD - Salle de jeux INT2	164	55	6,4%	2,2%	34,3	291	21	6,0	14
Bat B - STD - Salle de jeux INT3	164	52	6,4%	2,0%	34,1	280	19	6,7	14

Tableau 20 : Résultats pour trois MCP différents

Ces résultats sont cohérents avec l'étude précédente concernant la température de fusion/solidification. L'ensemble de ces matériaux présente des caractéristiques similaires notamment au niveau de leur température de solidification. Cette température, pour les trois matériaux, se situe en dessous de la température nocturne des pièces étudiées lors de la période estivale. Ceci explique ainsi les résultats similaires donnés par la simulation, bien que leurs valeurs de chaleur latente (kJ/kg) soient différentes. De plus, même si les matériaux Energain et Micronal ont une plage de température de fusion large de 5°C, celle-ci n'est pas suffisante pour ce cas d'étude, où la température nocturne ne baisse globalement pas en dessous de 28°C la nuit sur la semaine la plus chaude.

3.4.3 Influence des parois équipées de MCP

Il s'agit maintenant de tester l'impact sur le confort estival des parois équipées de MCP. Pour cela, les trois configurations ci-dessous ont été testées.

Référence – Murs extérieurs non isolés + plancher intermédiaire classique + cloisons classiques

INT 1 – Murs sur extérieur, non isolés : mise en place du matériau Enerciel 28

INT 2 - Murs sur extérieur, non isolés, plancher intermédiaire et cloisons internes : mise en place du matériau Enerciel 28

Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH (>28°C)	Nombre de vagues de chaleur (≥30 °C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Dortoir - Référence	49	2	4,7%	0,2%	30,4	49	8	5,8	9
Bat B - STD - Dortoir INT1	47	1	4,5%	0,1%	30,2	37	2	4,5	5
Bat B - STD - Dortoir INT2	32	0	3,1%	0,0%	29,6	17	1	4,0	1
/									
Bat B - STD - Salle de jeux - Référence	164	54	6,4%	2,1%	33,9	277	18	7,1	15
Bat B - STD - Salle de jeux INT1	165	49	6,5%	1,9%	33,8	255	16	4,9	12
Bat B - STD - Salle de jeux INT2	164	51	6,4%	2,0%	33,8	254	16	4,3	12

Tableau 21 : Résultats concernant l'influence des parois équipées en MCP

Les résultats mettent en évidence que la mise en place de MCP sur les parois verticales, donnant sur l'extérieur, permet une baisse des DH et du nombre de vagues de chaleur constaté. L'équipement avec des MCP des parois intérieures (murs de refends et cloisons légères) n'a pas les mêmes effets selon l'orientation de la pièce étudiée. En effet, dans le dortoir, cela permet une nette diminution de la température maximale (passage de 30,2 à 29,6 °C) et des DH (37 à 17). En revanche, dans la salle de jeux, orientée au sud, on note aucun changement significatif en rajoutant des MCP sur les parois intérieures. La mise en place de MCP sur l'ensemble des parois est intéressante dans le dortoir car la chaleur transitant dans la crèche (de la salle de jeux jusqu'au dortoir) permet d'être stockée dans les parois intérieures et de ne pas directement pénétrer dans la crèche au cours de la journée. Pour la salle de jeux, les MCP sur les parois extérieures sont uniquement pertinents car il s'agit de la pièce au sein de la crèche qui est la plus chaude en raison de sa fonction et des apports solaires importants comme le montrent les résultats horaires ci-dessous (à 14h, 30,7°C dans la salle de jeux contre 28°C dans le dortoir étudié).

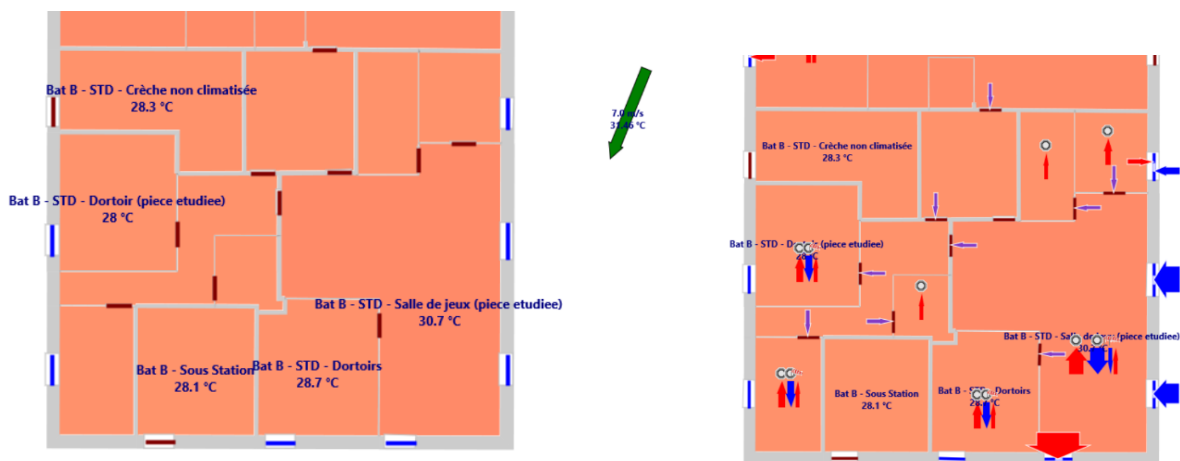


Figure 53 : Résultats du calcul aéroulique et de la température, dans la crèche, à 14h

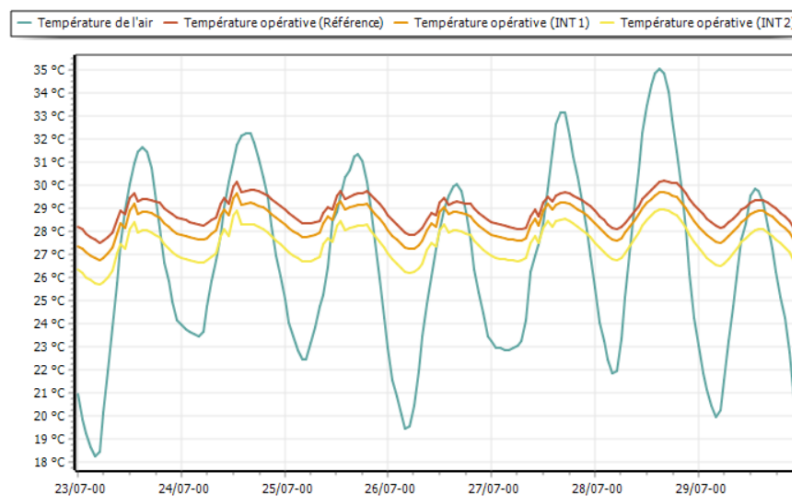


Figure 54 : Evolutions de la température sur la semaine la plus chaude pour le dortoir

Comme le montre le graphique ci-dessus, dans le dortoir, la mise en place de MCP sur toutes les parois (cloisons, murs extérieurs, et plafond) permet de gagner globalement 1°C supplémentaire sur la semaine la plus chaude par rapport au cas où seules les parois extérieures sont équipées de MCP.

3.4.4 Influence du couplage isolation (ITI/ITE) avec MCP

Il s'agit de tester ici l'influence des MCP sur des murs déjà isolés, par l'intérieur et par l'extérieur.

Référence - ITI sans MCP

INT 1 - ITI avec MCP (Enerciel 28) sur l'ensemble des parois

Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH (>28°C)	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Salle de jeux - Référence	167	55	6,6%	2,2%	34,2	283	19	5,4	13
Bat B - STD - Salle de jeux INT1	164	50	6,4%	2,0%	33,9	263	17	5,4	13
Bat B - STD - Dortoir - Référence	50	2	4,8%	0,2%	30,5	40	3	6,3	8
Bat B - STD - Dortoir INT1	48	1	4,6%	0,1%	30,3	37	3	5,0	7

Tableau 22 : Résultats d'une ITI avec et sans MCP

Référence - ITE sans MCP

INT 1 - ITE avec MCP (Enerciel 28) sur l'ensemble des parois

Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH (>28°C)	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Salle de jeux - Référence	150	40	5,9%	1,6%	33,7	227	15	4,5	12
Bat B - STD - Salle de jeux INT1	148	39	5,8%	1,5%	33,7	223	15	4,1	11
Bat B - STD - Dortoir - Référence	37	0	3,6%	0,0%	29,8	24	1	4,0	4
Bat B - STD - Dortoir INT1	37	0	3,6%	0,0%	29,7	21	1	4,0	4

Tableau 23 : Résultats d'une ITE avec et sans MCP

En premier lieu, on remarque que les résultats du cas de référence ne sont pas les mêmes suivants l'ITI et l'ITE. En effet, une ITI dégrade l'inertie thermique du bâtiment. D'une manière générale, que ce soit pour l'ITI et l'ITE, l'ajout du MCP ne permet pas de visualiser des différences notables dans les résultats. L'ajout du MCP permet notamment l'augmentation de l'inertie thermique des parois. Néanmoins,

aucune intervention portant sur le renouvellement d'air n'est réalisée, ce qui ne permet pas d'évacuer la chaleur lorsque celle-ci est restituée par les parois. Ceci peut ainsi expliquer l'absence d'une différence significative dans les résultats.

3.4.5 Conclusion des études préliminaires

Ces études préliminaires montrent ainsi que la température de fusion est une des caractéristiques les plus importantes pour le choix du matériau dans le cadre du confort estival. La température de fusion (ou plage de fusion) doit en effet être cohérente avec le climat extérieur et permettre au matériau de réaliser son changement d'état quotidiennement afin qu'un impact significatif sur les températures puisse être constaté. En plus de cela, le matériau sera d'autant plus intéressant que sa chaleur latente sera élevée. La mise en place de ces matériaux sur l'ensemble des parois de la pièce à traiter (murs donnant sur l'extérieur, murs de refend, cloisons, plafond) permet d'obtenir de meilleurs résultats bien que la mise en place des MCP uniquement sur les parois donnant sur l'extérieur aboutit à des résultats déjà satisfaisants. Enfin, la mise en place de MCP sur des murs déjà isolés permet des gains faibles car l'isolation peut rendre difficile l'évacuation de la chaleur accumulée au cours de la journée et libérée par le MCP la nuit.

3.5 Etude des MCP sur le cas d'étude

3.5.1 Impact des MCP sur l'état initial

A présent, appliquons ce que l'on vient de voir sur notre état initial de notre cas d'étude, pour les trois pièces étudiées. D'après ce qui a été vu, notre choix porte sur le matériau Enerciel 28 appliqué sur les murs, cloisons et plafond. Dans notre cas, une ITI a déjà été mise en œuvre. Ci-dessous, les résultats obtenus pour l'état initial sans et avec le MCP.

Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Dortoir - Etat Initial	50	2	4,8%	0,2%	30,5	40	3	6,3	8
Bat B - STD - Dortoir - Avec MCP	31	0	3,0%	0,0%	29,8	18	1	4,0	4

Bat B - STD - Salle de jeux - Etat Initial	167	55	6,6%	2,2%	34,2	283	19	5,4	13
Bat B - STD - Salle de jeux - Avec MCP	163	54	6,4%	2,1%	34,3	273	19	4,8	12

Bat B - STD - Logement - Etat Initial	415	170	6,2%	2,5%	33,7	1045	35	10,9	21
Bat B - STD - Logement - Avec MCP	346	92	5,2%	1,4%	32,4	753	30	9,7	19

Tableau 24 : Résultats de l'Etat Initial avec et sans MCP

Comme le montre les résultats, la mise en place des MCP permet de diminuer les DH des trois pièces mais leur seule utilisation n'est pas suffisante pour garantir un confort estival optimal pour les usagers.

L'ajout du MCP n'a pas le même impact selon les pièces, notamment dans la salle de jeux où l'ajout du MCP impacte peu les résultats. En effet, les matériaux permettent d'améliorer l'inertie de notre bâtiment mais cela rend plus difficile l'évacuation de la chaleur lorsque cette intervention n'est pas couplée à des interventions concernant le renouvellement d'air ou bien encore la limitation des apports solaires. En effet, regardons dans un premier temps, dans les deux parties suivantes, l'impact de l'ouverture et de la fermeture des fenêtres.

3.5.2 Impact de l'ouverture des fenêtres sur le confort estival

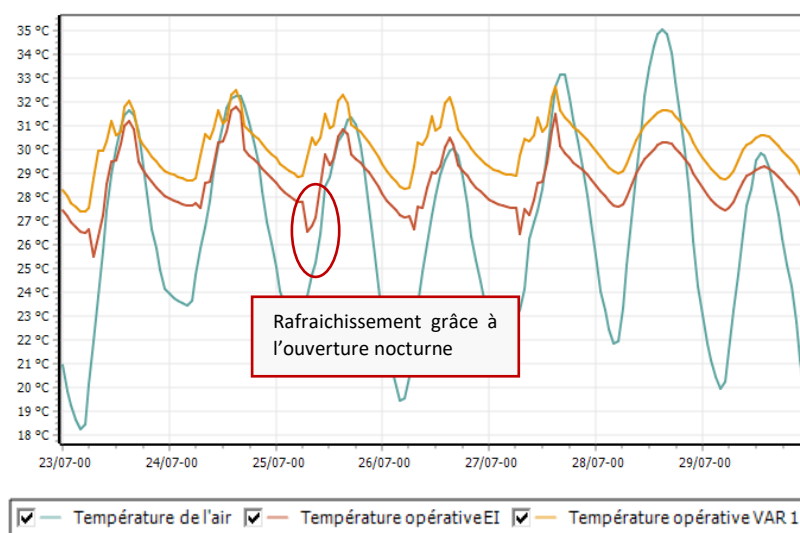


Figure 55 : Evolutions de la température sur la semaine la plus chaude, pour le logement (EI = Etat Initial ; VAR1 = Pas d'ouverture)

Le graphique ci-dessus souligne que l'ouverture des menuiseries est primordiale afin d'abaisser les températures. Elle permet le renouvellement d'air et l'élimination des calories existantes.

L'ouverture des fenêtres est intéressante lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure du bâtiment. En fermant les fenêtres lorsque la température extérieure est supérieure, on note un ralentissement dans l'augmentation de la température intérieure. Les résultats ci-dessous, pour le logement, montrent que l'ouverture des fenêtres permet de diviser environ par 4 les DH. En période d'occupation, 6,1% de la température en période d'occupation est supérieure à 28°C, contre 16,7% sans ouverture.

Bat B - STD - Logement				
Simulation	T>28°C	%T>28°C	Tmax	DH
Etat Initial (avec ouverture)	406	6,1%	33,6	1018
Etat Initial (sans ouverture)	1119	16,7%	35,5	3957

Tableau 25 : Résultats avec et sans ouverture pour le logement

3.5.3 Impact des dispositifs d'occultation sur le confort estival

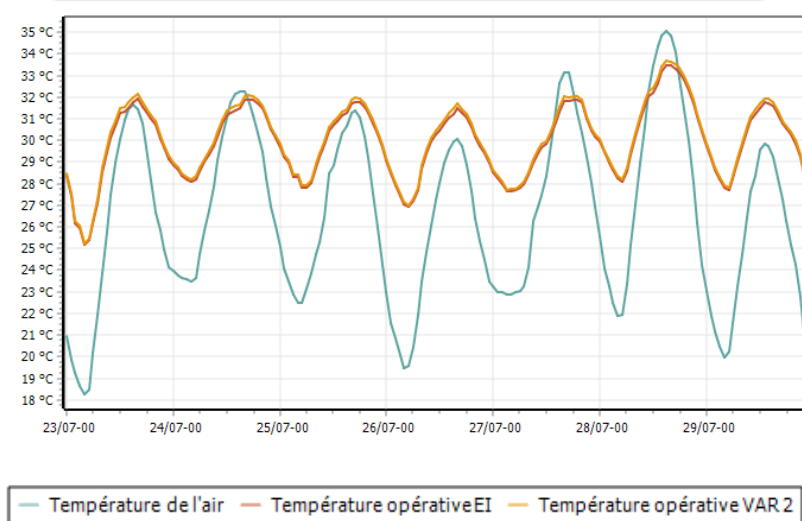


Figure 56 : Evolutions de la température sur la semaine la plus chaude, pour le logement (EI = Etat Initial ; VAR2 = Pas d'occultation)

Bat B - STD - Logement				
Simulation	T>28°C	%T>28°C	Tmax	DH
Etat Initial (avec occultation)	406	6,1%	33,6	1018
Etat Initial (sans occultation)	442	6,6%	33,8	1101

Tableau 26 : Résultats avec et sans occultation pour le logement

Comme le montre le graphique et les résultats pour le logement, l'absence de dispositifs d'occultation par rapport à l'état initial a peu d'influence sur les indicateurs. En effet, ceci s'explique par le fait que les protections intérieures actuelles (rideaux intérieurs) sont peu efficaces. Des protections performantes (Brise Soleil Orientable, Volets) permettraient d'obtenir des résultats significatifs

L'ouverture des fenêtres et les dispositifs d'occultation sont des interventions intéressantes pour limiter les surchauffes en période estivale. Il s'agit donc à présent d'étudier les combinaisons d'interventions possibles en lien avec les MCP. Ainsi, trois couplages de solutions avec MCP vont être testés en lien avec trois interventions : aération naturelle nocturne, mise en place de dispositifs d'occultation et sur-ventilation mécanique nocturne. Pour chacune de ces interventions, une fiche récapitulative résumant les principaux points et caractéristiques, est proposée en annexes 6.

3.5.4 1^{ère} combinaison : MCP avec ouverture nocturne

L'ensemble des parois est équipé du MCP Enerciel 28. On ajoute à cela une ouverture nocturne des fenêtres de 20h à 10h en période estivale. L'ouverture des fenêtres la nuit permet de faire circuler l'air

dans la pièce. Cela a pour conséquence d'abaisser la température intérieure en évacuant la chaleur accumulée la journée par les murs et notamment restituée par le MCP.

Aération Nocturne									
Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Dortoir - Sans MCP	37	0	3,6%	0,0%	29,7	23	2	4,0	4
Bat B - STD - Dortoir - Avec MCP	18	0	1,7%	0,0%	29,3	8	1	4,0	4
Bat B - STD - Salle de jeux - Sans MCP	126	28	4,9%	1,1%	31,6	156	12	4,8	12
Bat B - STD - Salle de jeux - Avec MCP	112	17	4,4%	0,7%	31,2	126	11	3,5	8
Bat B - STD - Logement - Sans MCP	411	167	6,1%	2,5%	33,6	1027	24	10,9	21
Bat B - STD - Logement - Avec MCP	316	78	4,7%	1,2%	32,3	679	22	9,7	17

Tableau 27 : Résultats de la 1ère combinaison avec et sans MCP

Les résultats montrent une efficacité de l'aération nocturne plus importante lorsque les parois sont équipées de MCP. Dans le logement, les DH passent de 1027 à 679 et 156 à 126 dans la salle de jeux. Le nombre d'heures où la température est supérieure à 30°C est divisé par 2 pour le logement.

Les diagrammes ci-dessous permettent de mieux visualiser les gains pour le logement, sans et avec l'ajout du MCP. On voit globalement que les températures supérieures ont largement diminuées, particulièrement sur le mois de juillet et mi-juin.

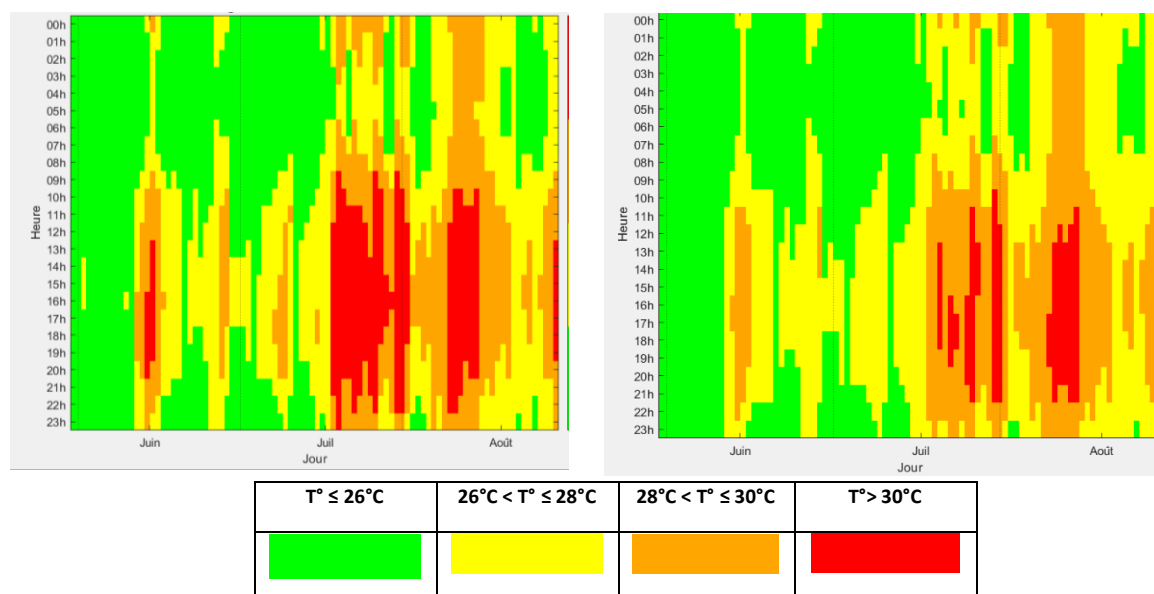


Figure 57 : Diagramme présentant les résultats de l'aération nocturne sans MCP (gauche) et avec MCP (droite) pour le logement

Les résultats montrent ainsi que l'ajout d'une masse thermique couplé à une ventilation nocturne permet d'augmenter l'efficacité de la ventilation nocturne. Il s'agit néanmoins de protéger le bâtiment contre les intrusions lorsque cette aération nocturne est mise en place.

3.5.5 2^{ème} combinaison : MCP avec occultation

L'ensemble des parois est équipé du MCP Enerciel 28. De plus, les systèmes actuels d'occultations (stores et rideaux intérieurs) sont remplacés par des systèmes performants. Des BSO (Brise Soleil Orientable) ont été considérés dans la simulation. Les performances du dispositif simulé sont présentées ci-dessous avec les performances de l'ancien dispositif d'occultation.

Dispositif d'occultation	Stores ou rideaux intérieurs	BSO
Performance intrinsèque	10%	90%
Taux d'utilisation de 8h à 22h	70%	70%
Performance totale	7%	63%

Les résultats de la simulation mettent en évidence des gains supplémentaires lors de l'ajout du MCP, en particulier pour le logement orienté au sud (passage de 564 DH à 333 DH). Pendant les heures d'occupation, le pourcentage des températures supérieures à 28°C a baissé de 3,5% à 2,8%. Dans la salle de jeux, l'ajout du MCP a un impact moins significatif que dans le logement. Ceci peut s'expliquer par les apports internes (notamment l'occupation) qui représentent une part importante des apports totaux.

Occultation									
Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Dortoir - Sans MCP	26	0	2,5%	0,0%	29,4	16	1	4,0	4
Bat B - STD - Dortoir Avec MCP	17	0	1,6%	0,0%	29,1	8	1	4,0	4
Bat B - STD - Salle de jeux - Sans MCP	134	45	5,3%	1,8%	34,4	235	15	4,4	11
Bat B - STD - Salle de jeux - Avec MCP	116	22	5,0%	0,8%	34,0	215	13	3,5	8
Bat B - STD - Logement - Sans MCP	237	89	3,5%	1,3%	32,7	564	21	8,1	13
Bat B - STD - Logement - Avec MCP	188	18	2,8%	0,3%	31,3	333	8	4,4	10

Tableau 28 : Résultats de la 2ème combinaison avec et sans MCP

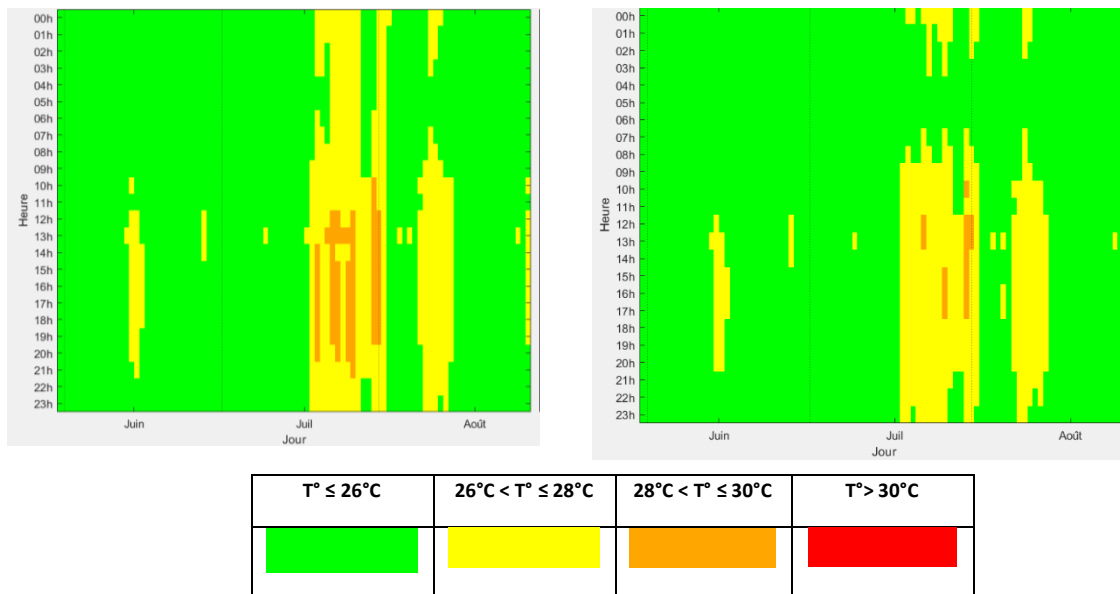


Figure 58 : Diagramme présentant les résultats de l'occultation sans MCP (gauche) et avec MCP (droite) pour le dortoir

Dans le dortoir, la mise en place de MCP en plus des dispositifs d'occultation permet de diminuer de manière significative les températures situées entre 28°C et 30°C durant la période d'occupation du dortoir, c'est-à-dire de 13h à 15h.

Les résultats montrent ainsi que l'ajout des MCP à la mise en place de dispositifs d'occultation performants permet une amélioration significative du confort d'été. Malgré un investissement élevé et une consommation en éclairage potentiellement plus élevée, ce couplage est particulièrement efficace sur les orientations Sud, Est et Ouest.

3.5.6 3^{ème} combinaison : MCP avec sur-ventilation nocturne

Dans cette combinaison, l'ensemble des parois est équipé du MCP Enerciel 28. On ajoute à cela une sur-ventilation mécanique nocturne de 18h à 09h, de mi-juin à mi-septembre, égale à 1,5 fois le débit habituellement mis en place. On passe ainsi de 75 m³/h à 117 m³/h pour le dortoir, de 375 à 563 m³/h pour la salle de jeux et de 35 à 53 m³/h pour le studio (nécessite le remplacement de la SF par une DF). Cette intervention a pour conséquence d'abaisser la température intérieure en évacuant la chaleur accumulée la journée par les murs et le MCP.

Sur-ventilation Mécanique Nocturne									
Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Dortoir - Sans MCP	44	1	4,2%	0,1%	30,3	32	3	4,3	5
Bat B - STD - Dortoir Avec MCP	27	0	2,6%	0,0%	29,5	13	1	4,0	4

Bat B - STD - Salle de jeux - Sans MCP	158	53	6,2%	2,1%	34,1	264	17	5,3	12
Bat B - STD - Salle de jeux - Avec MCP	152	47	6,0%	1,8%	33,8	243	16	5,0	12

Bat B - STD - Logement - Sans MCP	406	166	6,1%	2,5%	33,6	1013	34	10,5	20
Bat B - STD - Logement - Avec MCP	310	77	4,6%	1,1%	32,3	659	25	9,5	16

Tableau 29 : Résultats de la 3ème combinaison avec et sans MCP

Les résultats montrent une efficacité de la sur-ventilation mécanique nocturne plus importante lorsque les parois sont équipées de MCP. Dans le logement, les DH passent de 1013 à 659 avec un abaissement de la température maximale de plus de 1°C. Le nombre d'heures où la température est supérieure à 30°C est divisé par 2 pour le logement.

Les résultats montrent ainsi que l'ajout d'une masse thermique couplé à une sur ventilation mécanique nocturne permet d'augmenter l'efficacité de la ventilation nocturne. Néanmoins, par rapport à une aération nocturne, la mise en place d'une sur-ventilation augmente les consommations électriques du bâtiment. La problématique de l'intrusion n'est cependant pas à étudier par rapport à l'aération nocturne.

3.5.7 Scénario

Maintenant que nous avons vu l'impact des MCP en lien avec d'autres interventions, un scénario couplant la mise en place de MCP, de dispositifs d'occultation et d'une aération nocturne a été simulé. Pour le renouvellement d'air, l'aération nocturne a été retenue par rapport à la sur-ventilation car elle n'engendre aucune consommation électrique supplémentaire. Les résultats suivants sont obtenus :

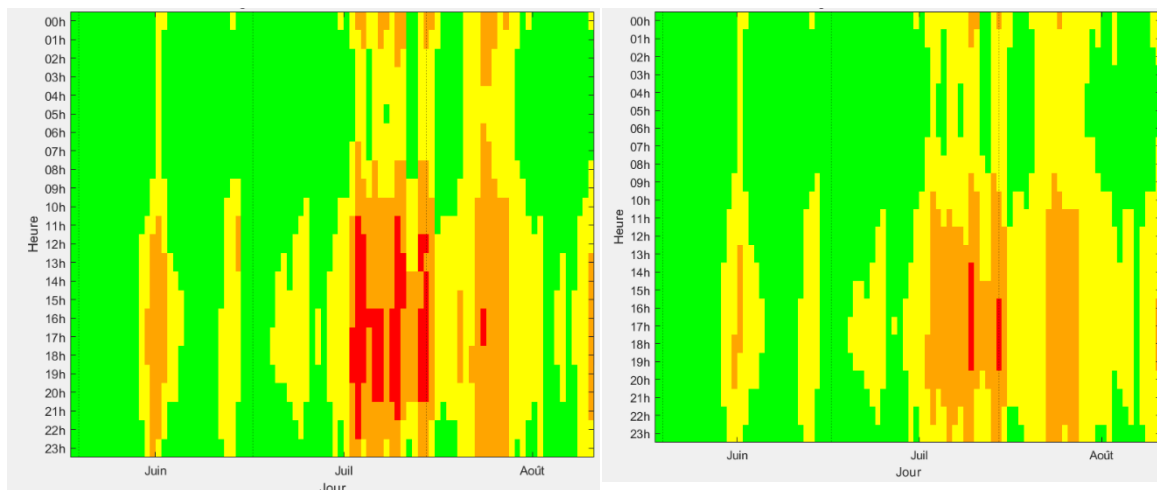
Scénario : aération nocturne + dispositifs d'occultation type BSO									
Zone	T>28°C	T>30°C	%T>28°C	%T>30°C	Tmax	DH	Nombre de vagues de chaleur (≥ 30°C)	Durée moyenne (h)	Durée maximale (h)
Bat B - STD - Dortoir - Etat Initial	50	2	4,8%	0,2%	30,5	40	3	6,3	8
Bat B - STD - Dortoir - Sans MCP	21	0	2,0%	0,0%	28,8	7	2	1,0	4
Bat B - STD - Dortoir - Avec MCP	5	0	0,5%	0,0%	28,5	1	1	1,0	4

Bat B - STD - Salle de jeux - Etat Initial	167	55	6,6%	2,2%	34,2	283	19	5,4	13
Bat B - STD - Salle de jeux - Sans MCP	88	9	3,5%	0,4%	30,6	87	5	3,0	5
Bat B - STD - Salle de jeux - Avec MCP	81	4	3,2%	0,2%	30,3	67	3	2,7	4

Bat B - STD - Logement - Etat Initial	415	170	6,2%	2,5%	33,7	1045	35	10,9	21
Bat B - STD - Logement - Sans MCP	259	99	3,9%	1,5%	32,4	649	22	9,0	15
Bat B - STD - Logement - Avec MCP	198	21	3,0%	0,3%	31,3	397	10	5,1	11

Tableau 30 : Résultats du scénario avec et sans MCP

Les résultats montrent des gains significatifs pour le scénario sans MCP dans l'ensemble des pièces étudiées avec une forte diminution des DH et du nombre de vagues de chaleur. L'ajout de MCP au scénario permet des gains supplémentaires variables selon les pièces. L'ajout de MCP dans le logement permet encore de diviser par 2 les DH par rapport au scénario sans MCP. La température maximale chute d'1°C supplémentaire et le nombre de vagues de chaleur est également divisé par 2. L'efficacité des MCP est d'ailleurs largement visible sur les diagrammes ci-dessous, où l'on note une diminution importante des températures supérieures à 30°C (couleur rouge) en période estivale avec une diminution de la durée où les températures sont supérieures à 28°C (couleur orange). En effet, ces dernières se concentrent en journée et ont tendance à être moins présentes la nuit.



T° ≤ 26°C	26°C < T° ≤ 28°C	28°C < T° ≤ 30°C	T° > 30°C

Figure 59 : Diagramme présentant les résultats du scénario sans MCP (gauche) et avec MCP (droite)

Enfin, l'ajout de MCP dans le dortoir et dans la salle de jeux a des impacts plus limités en comparaison avec le logement. Ces matériaux présentent néanmoins des résultats satisfaisants en permettant une diminution des DH, de la température maximale et de la fréquence et durée des vagues de chaleur.

3.6 Etude des MCP sur les consommations énergétiques à l'échelle du site

Maintenant que nous avons pu tester l'influence des MCP sur le confort estival, nous allons étudier l'utilisation des MCP dans la diminution des consommations énergétiques. Nous proposons pour cela de mettre en place des MCP sur les murs donnant sur l'extérieur, mais également en plancher haut pour les bâtiments B et G. En effet, ces bâtiments abritent la quasi-totalité des logements et une crèche. En plus d'améliorer le confort d'été de ces logements par la mise en place de MCP, ils seraient intéressants de voir si cela impacte significativement les consommations énergétiques.

Les matériaux testés sont Enerciel 23, Enerciel 28, Micronal BASF et Energain. Les résultats de la simulation, par rapport à l'Etat Initial, sont les suivants :

		Economie Annuelle Energie Finale kWh/ EF PCI
Travaux sur le bâti	Bat B et G : Mise en place de MCP Enerciel 23 sur les murs extérieurs	2 482
	Bat B et G : Mise en place de MCP Enerciel 28 sur les murs extérieurs	2 478
	Bat B et G : Mise en place de MCP Micronal BASF sur les murs extérieurs	2 936
	Bat B et G : Mise en place de MCP Energain sur les murs extérieurs	2 449
	Bat B et G : Mise en place de MCP Energain sur les planchers hauts	1 990

Tableau 31 : Résultats des interventions intégrant des MCP sur les consommations énergétiques à l'échelle du site

On remarque que les MCP ne permettent pas de réaliser des économies très importantes. Les économies sont de l'ordre de 2000 kWh, ce qui représente environ 0,1% de réduction des consommations énergétiques à l'échelle du site et 0,6% à l'échelle du bâtiment B. En effet, les murs du site, constitués de béton et d'une ITI présentent déjà une inertie importante. Bien que l'ajout des MCP améliore le confort d'été dans ces logements, ils ne permettent pas une réduction des consommations en climatisation car les logements n'en sont pas équipés. Les réductions des consommations constatées concernent ainsi la partie de la crèche qui est climatisée. On note aussi une légère diminution des consommations de RCU en lien avec le chauffage.

4 Discussion des résultats et limites

4.1 Impacts sur le confort d'été et les consommations énergétiques

L'étude menée met en évidence un impact significatif sur le confort d'été lorsque les MCP sont couplés avec d'autres solutions de rafraîchissement passif. D'un point de vue des consommations énergétiques, les MCP ne permettent pas une diminution très significative en raison de la simulation des MCP sur des bâtiments non climatisés (à l'exception de la crèche, le bâtiment B et le bâtiment G ne sont pas climatisés). Des impacts plus importants auraient probablement pu être identifiés si l'ensemble des logements avaient été climatisés. Dans tous les cas, afin que la mise en œuvre d'un MCP soit efficace et pertinente, des études préliminaires sont indispensables. La température de fusion impacte directement les résultats et impose une étude du climat où est situé le bâtiment.

Plus précisément, nous avons pu tester dans cette étude le couplage des MCP avec des solutions de rafraîchissement passif agissant sur les apports solaires et le renouvellement d'air. Le tableau ci-dessous classe l'ensemble des solutions passives qui pourraient être également utilisées et testées en complément des MCP afin d'aboutir à un confort estival satisfaisant.

Apports solaires	Apports internes	Enveloppe	Renouvellement d'air	Autres
Protections solaires fixes Protections solaires mobiles Protections solaires permanentes Films solaires	Systèmes et gestion des luminaires Gestion des équipements spécifiques	Menuiseries performantes Isolation (ITE) Inertie Etat de surface (Cool – roof)	Aération diurne et nocturne Ventilation SF Ventilation DF Ventilation DF adiabatique Geocooling Puits canadien	Brasseurs d'air Végétalisation

Tableau 32 : Classification des solutions passives

D'une manière globale, pour ce cas d'étude, les MCP sont davantage intéressants dans la recherche du confort thermique des occupants que dans la diminution des consommations énergétiques, au regard d'autres interventions moins coûteuses et génératrices de plus de gains énergétiques. Quelques interventions simulées sont présentées ci-dessous portant sur le pilotage et ne nécessitant aucun investissement :

		Economie Annuelle Energie Finale	
		kWh/ EF PCI et %	
Pilotage	Optimisation des paramètres de régulation de chauffage	147 573	4%
	Optimisation des paramètres de régulation de refroidissement	35 294	1%
	Mise en place d'une horloge sur la CTA des salles de restauration	17 313	0,5%

Tableau 33 : Résultats des interventions, portant sur le pilotage, sur les consommations énergétiques à l'échelle du site

L'impact des MCP sur les consommations énergétiques varie ainsi en fonction de l'état initial du bâtiment et de la performance actuelle de ses équipements et de son enveloppe. En fonction du bâtiment, certaines interventions peuvent s'avérer plus intéressantes et pertinentes dans l'atteinte des objectifs de réduction des consommations énergétiques.

4.2 Limites et perspectives

L'étude qui a été menée a été réalisée sur un logiciel de simulation thermique qui implique ainsi la nécessité de faire des hypothèses sur certains éléments de simulation. L'objectif est de représenter le plus fidèlement possible le comportement du bâtiment. Néanmoins, le modèle reste théorique et certains paramètres peuvent potentiellement générer des gains plus ou moins fidèles à la réalité.

Une modélisation sur le logiciel DesignBuilder serait également intéressante en complément de cette étude. DesignBuilder présente notamment une bibliothèque de MCP plus importante dont les données disponibles sont certifiées et plus précises sur le volet économique et environnemental. La bibliothèque est présentée en annexe 7.

Carbone Incorporé	
<input checked="" type="checkbox"/> Donnée disponible Carbone incorporé	
Carbone incorporé (kgCO ₂ /kg)	1,86
Nom du facteur de conversion	General Insulation
Source	ICE v1.6
Supposition / facteur limite	Mix of insulation material in the UK, cradle-to-gate

Coût	
Type de coût	1-Coût par surface
Coût par surface (£/m ²)	24,000

Figure 60 : Exemples de données environnementales et économiques pour le BioPCM M182/Q27 de la bibliothèque DesignBuilder

Les MCP disponibles sont plus importants avec notamment le « BioPCM » (fabrication locale et utilisation de matériaux d'origine végétale). Le logiciel propose par ailleurs un *template* « PCM

Exemple » (présentant deux bâtiments de bureaux, identiques, l'un étant équipé de MCP et l'autre non) permettant de tester l'efficacité des MCP (Annexe 7).

La prise en compte des MCP ainsi que les données modifiables par l'utilisateur, sur DesignBuilder, apparaissent également plus détaillées. L'édition d'un MCP permet d'ajouter notamment jusqu'à seize paires enthalpies/températures et apparaît ainsi plus précise dans la prise en compte du matériau lors du calcul. Le graphique ci-dessous met en évidence seize paires pour le BioPCM M182/Q27.

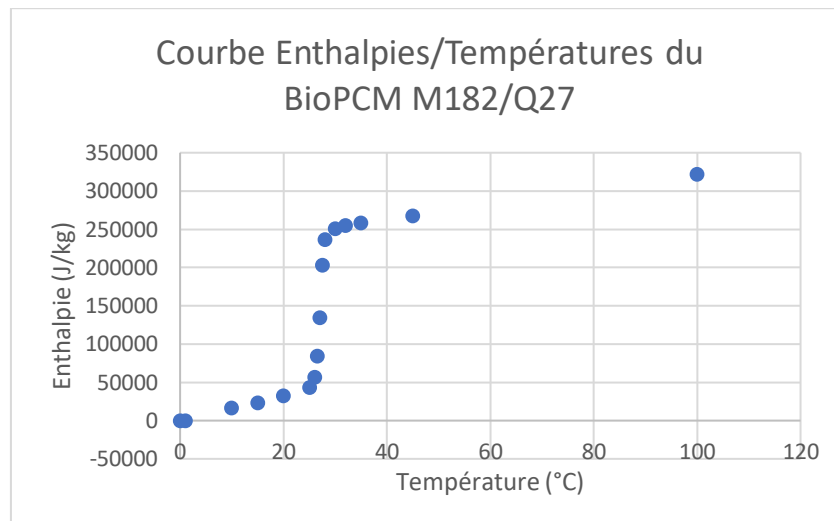


Figure 61 : Evolution de l'enthalpie en fonction de la température pour le BioPCM M182/Q27

Enfin, le logiciel propose de mener des analyses paramétriques et/ou d'optimisation. Ces analyses pourraient être intéressantes à tester dans la recherche du meilleur MCP en concordance avec le climat du projet.

Pour revenir à notre étude, les résultats sur le confort d'été sont, en partie, liés au comportement des usagers et à leurs implications dans ces actions (utilisation adéquate des dispositifs d'occultations, aération nocturne, ...). Comme énoncé précédemment, le modèle est théorique et suppose une application des interventions cohérentes par les usagers. Pour arriver aux résultats simulés, l'implication des usagers est donc primordiale.

L'état initial, dans le cadre du confort d'été, se justifie avec les observations faites sur site (mesures de la température, ressentis des usagers, ...). L'idéal serait de disposer de capteurs de températures mesurant au pas de temps horaire les températures de la pièce afin de caler de la manière la plus juste l'état initial de départ.

L'étude menée reste néanmoins satisfaisante et soulève par ailleurs des questionnements sur l'impact des MCP en hiver. Dans notre étude, la température de fusion choisie pour le MCP a été en cohérence avec l'objectif de confort d'été. Dès lors, la diminution des consommations énergétiques reste limitée. Il serait intéressant à présent de mesurer l'impact de ces matériaux en hiver sur les consommations énergétiques et le confort thermique.

Enfin, notre étude se focalise uniquement sur l'aspect des gains induits par l'utilisation des MCP. Il serait intéressant de considérer également les aspects environnementaux et économiques. Certains des MCP nécessitent des processus de fabrication complexes, généralement émetteurs de CO₂ et relativement coûteux. Il serait ainsi intéressant de réaliser des études sur le volet économique et environnemental et de les mettre en perspective avec les autres solutions de rafraîchissement passif

existantes ou bien d'autres matériaux plus classiques. Actuellement, sur la base INIES, seules des données par défaut sont disponibles pour le produit « Plaque de plâtre contenant des matériaux à changement de phase ». (47)

Pour conclure, le temps du TFE apparaît comme une variable limitante. De ce fait, il a fallu faire des choix quant aux éléments étudiés et simulés (logiciel utilisé, paramètres testés, nombres de pièces étudiées, ...). D'autres typologies de bâtiments (matériaux de construction, usages) auraient pu être testées (bureaux, construction légère, ...) mais aussi d'autres matériaux à changement de phase.

Conclusion

L'objectif initial du rapport était l'étude des matériaux à changement de phase comme régulation thermique dynamique dans le secteur du bâtiment, notamment lors des rénovations. Il s'agissait d'identifier l'impact des MCP sur le confort d'été tout en regardant les résultats d'un point de vue des consommations énergétiques.

Pour cela, nous avons identifié dans une première partie le contexte et les enjeux dans lequel s'ancre cette étude. Les bâtiments, confrontés à de plus en plus de surchauffes, accentuées notamment par les effets d'ilots de chaleur, doivent assurer une qualité d'environnement intérieur satisfaisante tout en étant efficaces d'un point de vue énergétique. Nous avons notamment expliqué la complexité de la notion de confort thermique, tant les paramètres qui le composent sont nombreux et interdépendants. Finalement, la démarche de travail comprenant l'audit énergétique et l'étude de confort d'été a été présentée.

C'est ensuite dans une seconde partie que nous avons réalisé un état de l'art concernant ces matériaux à changement de phase. Après avoir défini les principes physiques de ces matériaux, nous avons vu quels sont les paramètres essentiels pour ce type de matériau, tels que la température de fusion ou encore la chaleur latente. Divers types de MCP existent, chacun présentant des avantages et des inconvénients. Dans le choix d'un MCP, il s'agit de porter une attention particulière aux phénomènes de surfusion et de ségrégation tout en considérant les problématiques liées à la corrosion ou encore à l'inflammabilité. Actuellement, les types de matériaux les plus utilisés sont les MCP organiques tels que les paraffines. La mise en place de ces matériaux peut se faire de manière active, en l'incorporant dans les matériaux de construction ou bien de manière passive, en l'intégrant par exemple dans des systèmes de ventilation.

L'état de l'art des MCP nous a ensuite permis d'étudier précisément l'impact des MCP sur le confort d'été et de tester son efficacité sur les consommations énergétiques. Les études préliminaires montrent que le choix de la température de fusion en fonction du climat et des variations journalières est primordiale pour la bonne efficacité du matériau. En fonction de l'objectif recherché et du climat où est mis en place le matériau, un MCP ne peut généralement pas traiter à la fois le confort d'hiver et le confort d'été. De plus, l'influence d'un MCP sur un mur isolé ou non isolé a peu d'importance. La mise en place de MCP sur les murs extérieurs donne des résultats importants.

La suite de l'étude montre une amélioration du confort estival pour l'état initial lorsque les parois sont équipées de MCP. Néanmoins, les résultats ne permettent pas des gains très significatifs. En revanche, l'emploi des MCP en relation avec d'autres solutions de rafraîchissement passif apparaît très intéressant. Le renouvellement d'air (aération nocturne ou sur-ventilation mécanique) est intéressant car il permet d'évacuer les calories libérées la nuit par le MCP. De même, la mise en place de dispositifs d'occultation et l'usage de MCP permettent une amélioration significative des indicateurs du confort d'été en limitant les apports solaires dans le bâtiment. D'un point de vue des consommations énergétiques, l'emploi des MCP permet une réduction des consommations énergétiques relativement faible pour notre cas d'étude. En effet, il s'agit ici d'une étude sur le confort estival et le bâtiment qui a servi de cas d'étude présente des systèmes de climatisation dont la température de consigne modélisée n'a pas été changée avec l'emploi des MCP.

Finalement, une fois couplés à d'autres solutions de rafraîchissement passif, les MCP sont intéressants dans la recherche du confort estival. Leur impact sur les consommations énergétiques reste limité et varie suivant l'état initial (présence d'une climatisation, recherche du confort thermique d'hiver ou d'été). La question de la mise en œuvre en rénovation est également importante. Elle apparaît plus contraignante dans un contexte de rénovation qu'en construction. Effectivement, en rénovation, la mise en place de ce type de matériau implique un remplacement des murs intérieurs légers et une modification du revêtement et de la finition intérieure pour l'ensemble des parois d'une manière plus globale.

Pour conclure, cette étude a ainsi principalement concerné l'impact des MCP sur le confort estival mais il serait finalement intéressant d'étudier l'impact des MCP sur la thermique d'hiver et sur les consommations énergétiques associées. Une étude des MCP sur d'autres typologies de construction pourrait également être intéressante, tout en menant une analyse multicritère afin de mettre en perspective l'emploi de ce matériau par rapport à d'autres matériaux plus classiques, au regard des considérations environnementales, économiques ou bien encore sociales.

Bibliographie

1. Mukherji A, Thorne P, Cheung WWL, Connors SL, Garschagen M, Geden O, et al. SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6). Disponible: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
2. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2021 [En ligne]. Commissariat général au développement durable. Bilan énergétique de la France; [cité le 19 août 2023]. Disponible: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/6-bilan-energetique-de-la-france.php>
3. Chiffres clés du climat 2022 [En ligne]. Commissariat général au développement durable. Observations du changement climatique; [cité le 22 août 2023]. Disponible: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2022/1-observations-du-changement-climatique.php>
4. CNRS Le journal [En ligne]. Le réchauffement climatique en France s'annonce pire que prévu; [cité le 15 août 2023]. Disponible: <https://lejournel.cnr.fr/articles/le-rechauffement-climatique-en-france-sannonce-pire-que-prevu>
5. Ministères Écologie Énergie Territoires [En ligne]. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique – ONERC; [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc>
6. Ministères Écologie Énergie Territoires [En ligne]. Construction et performance environnementale du bâtiment; [cité le 20 août 2023]. Disponible: <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment>
7. BBCA. Carbone et Bâtiment [En ligne]. Association BBCA. [cité le 18 août 2023]. Disponible: <https://www.batimentbas carbone.org/carbone-batiment/>
8. Chiffres clés du climat [En ligne]. Commissariat général au développement durable. Émissions de GES du résidentiel et du tertiaire; [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/13-emissions-de-ges-du-residentiel-et-du-tertiaire.php>
9. Cerema [En ligne]. Consommation d'énergie dans les bâtiments – chiffres clés 2018; [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://reseau-chaleur.cerema.fr/espace-documentaire/consommation-denergie-dans-les-batiments-chiffres-cles-2018>
10. IEA [En ligne]. Air conditioning use emerges as one of the key drivers of global electricity-demand growth - News; [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://www.iea.org/news/air-conditioning-use-emerges-as-one-of-the-key-drivers-of-global-electricity-demand-growth>
11. Geo.fr [En ligne]. AFP. Le paradoxe des climatiseurs qui réchauffent la planète; 15 mai 2018 [cité le 29 août 2023]. Disponible: <https://www.geo.fr/environnement/le-paradoxe-des-climatiseurs-qui-rechauffent-la-planete-188607>
12. ADEME. La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires : état des lieux 2020. juin 2021; Disponible: <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4745-la-climatisation-de-confort-dans-les-batiments-residentiels-et-tertiaires.html>
13. Décret Tertiaire : tout savoir sur la réglementation [En ligne]. Advizeo. 2023 [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://www.advizeo.io/blog/decret-tertiaire/decret-tertiaire-tout-savoir-sur-la-reglementation/>
14. Alterea [En ligne]. Alterea, spécialiste du Décret Tertiaire; [cité le 12 août 2023]. Disponible: <https://www.alterea.fr/decret-tertiaire>
15. Association négaWatt [En ligne]. La démarche négaWatt; [cité le 12 août 2023]. Disponible: <https://negawatt.org/sobriete-efficacite>
16. ADEME. Bien ventiler son logement. juil 2023; Disponible: <https://librairie.ademe.fr/cadic/7180/guide-bien-ventiler-logement-202307.pdf>
17. Leaman A, Bordass B. Productivity in buildings: The « killer » variables. Build Res Inf. 14 oct 2010; January 1:4-19.

18. CIBSE. Module 138: Ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools – updated guidance [En ligne]. CIBSE Journal. [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2018-12-ven/>
19. ICEB. Les guides bio-tech : confort d'été passif. avr 2014; Disponible: https://www.asso-iceb.org/wp-content/uploads/2014/04/guide_bio_tech_confort_d_ete_passif.pdf
20. Lavoye F, Thellier F. Le confort thermique dans les bâtiments [En ligne]. 2008 [cité le 29 août 2023]. Disponible: <https://hal.science/hal-02180957>
21. CIBSE. CIBSE TM40 2020 - 2020 - Health and wellbeing in building services. 2020; Disponible: <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-resources/engineering-guidance/technical-memoranda/tm40-health-and-wellbeing-in-building-services>
22. Cerema [En ligne]. Ilots de chaleur : Agir dans les territoires pour adapter les villes au changement climatique; 7 nov 2017 [cité le 27 août 2023]. Disponible: <http://www.cerema.fr/fr/actualites/ilots-chaleur-agir-territoires-adapter-villes-au-changement>
23. ALTO Ingénierie. Démarche de la Simulation Thermique Dynamique. Non disponible : ressource interne
24. ALTEREA. Rapport d'audit énergétique pour la SPLA-IN. 2023. Non disponible : ressource interne
25. IZUBA Energies [En ligne]. IZUBA Energies : Simulation thermique dynamique - Module STD COMFIE; [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://www.izuba.fr/logiciels/outils-logiciels/simulation-std-sed/>
26. IZUBA Energies [En ligne]. Pack Meteonorm — Documentation des logiciels IZUBA énergies; [cité le 27 août 2023]. Disponible: https://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Pack_Meteonorm
27. Odru P. Stockage de la chaleur. [En ligne]. avr 2017 [cité le 27 août 2023]; Disponible: <https://www.techniques-ingenieur.fr/doi/10.51257/a/v1/be8597>
28. Annabac [En ligne]. Le diagramme d'état d'un corps pur; [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://www.annabac.com/revision-bac/le-diagramme-d-etat-d-un-corps-pur>
29. Borderon J. Intégration des Matériaux à Changement de Phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique. Disponible: <https://hal.science/tel-01614879/document>
30. Inertie thermique [En ligne]. Energie Plus Le Site. 2007 [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/autres-phenomenes-thermiques/inertie-thermique/>
31. Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, de Gracia A, Fernández AI. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 1 avr 2011;15(3):1675-95.
32. Sharshir SW, Joseph A, Elsharkawy M, Hamada MA, Kandeal AW, Elkadeem MR, et al. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. *Energy Build.* avr 2023;285:112908.
33. Bland A, Khzouz M, Statheros T, Gkanas E. buildings PCMs for Residential Building Applications: A Short Review Focused on Disadvantages and Proposals for Future Development. *Buildings.* 28 août 2017;7:78.
34. Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev.* févr 2009;13(2):318-45.
35. GLASSX [En ligne]. GLASSX. PCM Fassadenprodukte; [cité le 29 août 2023]. Disponible: <https://www.glassx.ch/de/produkte/pcm-fassadenprodukte/>
36. GLASSX. GLASSX®crystal : Das Glas, das speichert, wärmt und kühlt : [En ligne]. 2005 [cité le 29 août 2023]. Disponible: https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://glassx.jimdo.com/app/download/10112900052/Broschuer_klein_online.pdf?t=1503651139
37. Kamali S. Review of free cooling system using phase change material for building. *Energy Build.* 1 sept 2014;80:131-6.

38. Matériau à changement de phase (thermique). Dans: Wikipédia [En ligne]. 2023 [cité le 27 août 2023]. Disponible: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mat%C3%A9riau_%C3%A0_changement_de_phase_\(thermique\)&oldid=204273975](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mat%C3%A9riau_%C3%A0_changement_de_phase_(thermique)&oldid=204273975)
39. La gestion intelligente de la température sous sa forme la plus légère : MICRONAL[®] PCM SMARTBOARD[™] [En ligne]. BASF; [cité le 10 août 2023]. Disponible: http://www.lamaisonpassive.fr/forum/Basf/Micronal_Smartboard_fr.pdf
40. Le Stum L. Matériaux à Changement de Phase (Micronal) [En ligne]. BASF France; [cité le 13 juin 2023]. Disponible: <http://www.cstb.fr/archives/fileadmin/documents/webzines/energie-positive/pdf/materiaux-changement-phase.pdf>
41. [En ligne]. Rubitherm. Rubitherm GmbH; [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt>
42. ENERCIEL : Revêtement Intérieur thermorégulant [En ligne]. WINCO Technologies; [cité le 29 août 2023]. Disponible: <https://www.winco-tech.com/wordpress/wp-content/uploads/2016/04/20150430-BROCHURE-ENERCIEL-00601D-CP.pdf>
43. MCI Technologies. Catalogue : Matériaux à Changement de Phase [En ligne]. 2018 [cité le 29 août 2023]. Disponible: <https://www.winco-tech.com/wordpress/wp-content/uploads/2018/09/20180717-MCI-CATALOGUE-MATERIAUX-A-CHANGEMENT-DE-PHASE-2018.pdf>
44. Energain. DuPont[™] Energain[®] : Energy-saving thermal mass systems [En ligne]. 2012 [cité le 13 août 2023]. Disponible: https://cdn2.hubspot.net/hub/55819/file-14736951-pdf/docs/energain_flyer.pdf
45. Virgone J. Rapport final du projet PREBAT « IMCPBAT », Intégration des Matériaux à Changement de Phase dans le Bâtiment. 2010.
46. Google Earth [En ligne]. Vue 3D - Ecole Nationale des Greffes - Dijon; [cité le 27 août 2023]. Disponible: <https://earth.google.com/web/@47.33005881,5.04920605,250.51343577a,151.19968363d,35y,73.84029417h,63.73393566t,-Or>
47. [En ligne]. INIES. INIES | Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment; [cité le 30 août 2023]. Disponible: <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/infos-produit>

Liste des abréviations

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

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BSO : Brise Soleil Orientable

CIBSE : Chartered Institution of Building Services Engineers

CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment

CTA : Centrale de Traitement d'Air

CVC : Chauffage Ventilation Climatisation

DF : Double Flux (Ventilation)

DJU : Degré Jour Unifié

DT : Décret Tertiaire

ECS : Eau Chaude Sanitaire

EI : Etat Initial

GES : Gaz à Effet de Serre

IEA : International Energy Agency

INT : Intervention

ITE : Isolation Thermique par l'Extérieur

ITI : Isolation Thermique par l'Intérieur

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

MCP : Matériau à Changement de Phase

OPERAT : Observatoire de la Performance Energétique, de la Rénovation et des Actions du Tertiaire

PCAET : Plan Climat-Air-Energie Territorial

PMV : Predicted Mean Vote

PPD : Predicted Percentage Dissatisfied

RCU : Réseau de Chaleur Urbain

RE : Réglementation Environnementale

RT : Réglementation Thermique

SDE : Schéma Directeur Energie

SDP : Surface De Plancher

SED : Simulation Energétique Dynamique

SF : Simple Flux (Ventilation)

SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone

SSP : Shared Socio-economic Pathways

STD : Simulation Thermique Dynamique

V3V : Vanne 3 Voies

VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

Annexes





Annexe 1

Caractéristiques thermiques de l'acétate de sodium trihydraté

Nom	Acétate de sodium trihydraté
T_{fusion}	55 à 58 °C
L_f	$242,85 \times 10^3 \text{ J/kg}$
$C_{p_{\text{solide}}}$	$3,31 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ à 30 °C
$C_{p_{\text{liquide}}}$	$3,06 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ à 70 °C
ρ_{liquide}	1 279 kg/m ³ à 70 °C
ρ_{solide}	1 392 kg/m ³ à 30 °C

Annexe 2

Ressentis des occupants concernant le confort hivernal, estival, lumineux et acoustique

Confort	Ressenti des occupants / Note	Commentaires
Hivernal		Le confort hivernal est dépendant de chaque bâtiment. La rénovation globale du bâtiment B en 2016 a apporté des améliorations significatives au confort thermique de ce bâtiment. Les bâtiments F et G bénéficient également d'un bon confort thermique. En revanche, les bâtiments C, D et E, construits dans les années 80, présentent un niveau de confort hivernal faible. Cet inconfort vient de la faible performance de l'enveloppe thermique et de la présence d'infiltrations d'air.
Estival		Le confort d'été est faible dans l'ensemble des bâtiments. En effet, l'absence de protections solaires efficaces entraîne une augmentation significative de la température à l'intérieur des pièces. Cette situation rend l'environnement intérieur inconfortable et difficile à supporter en période caniculaire. Une étude STD confort a été réalisée afin de traiter cette problématique.
Lumineux		Le confort lumineux est bon : large accès à la lumière naturelle grâce aux nombreuses ouvertures.
Acoustique		Dans l'ensemble, l'acoustique du bâtiment est bonne et l'environnement alentour n'entraîne pas de fortes nuisances.

Annexe 3

Systèmes du bâtiment B

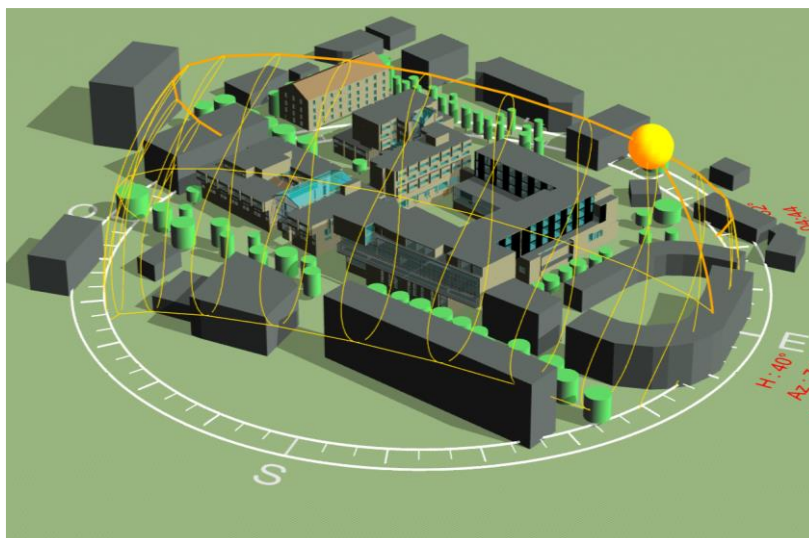
Systèmes					
Poste	Equipements	Zones desservies	Description	Perf.	Vét.
Chauffage	Production centrale		Sous station privée : Bouteille de découplage hydraulique	3	2
	Distribution secondaire	Studios	Pompe à débit variable SALMSON Sirius D 40 -80 P = 550 W Départ régulé par une V3V	3	2
		Crèche	Pompe à débit variable SALMSON Priux home D60-32/180 P = 40 W Départ régulé par une V3V	3	2
		Logement de fonction	Pompe à débit variable SALMSON Priux home D60-32/180 P = 40 W Départ régulé par une V3V	3	2
	Réseau de distribution	Localisation : Chaufferie	Avant pompe secondaire : réseau isolé avec 4 cm de laine de verre Après pompe secondaire : 2 cm de caoutchouc synthétique	2	2
	Régulation centrale	Ensemble des départs	GTC (Gestion Technique Centralisée)	3	2
	Régulation terminale	Ensemble des pièces	Robinets thermostatiques	3	2
	Emission	Ensemble des pièces	Radiateur acier	3	2
		Salles de bain	Sèche – serviettes	3	2
Ventilation	CTA	Crèche Localisation : Chaufferie	Ventilation mécanique Double Flux - FRANCE AIR COCOON T50 Débit : 612 m3/h P = 0,17 kW Récupération de chaleur	3	2
	Extracteur	Logements Localisation : Combles	Extracteur Simple Flux ALDES	1	1
Eau chaude sanitaire	Production centrale	Ensemble des pièces + Laverie Localisation : Chaufferie	Sous station privée : Echangeur à plaques ATLANTIC GUILLOT RUS 212DS non isolé (hiver) Résistance électrique ballon ECS (été)	1	0
	Distribution secondaire	Avant échangeur Localisation : Chaufferie	Pompe à débit constant SALMSON SXM32- 50 – P = 205 W	1	1

		Après échangeur Localisation : Chaufferie	Pompe à débit constant SALMSON SXM32-50 – P = 205 W	1	1
		Charge Localisation : Chaufferie	Pompe simple débit constant WILO Star Z25/6 P = 99 W	1	1
		Recyclage Localisation : Chaufferie	Pompe simple débit constant WILO Star Z25/6 P = 99 W	1	1
	Réseau de distribution secondaire	En galerie / gaine technique	Isolant en caoutchouc synthétique 2 cm	2	2
	Stockage	Ensemble des pièces Localisation : Chaufferie	Ballon 1000 litres	1	0

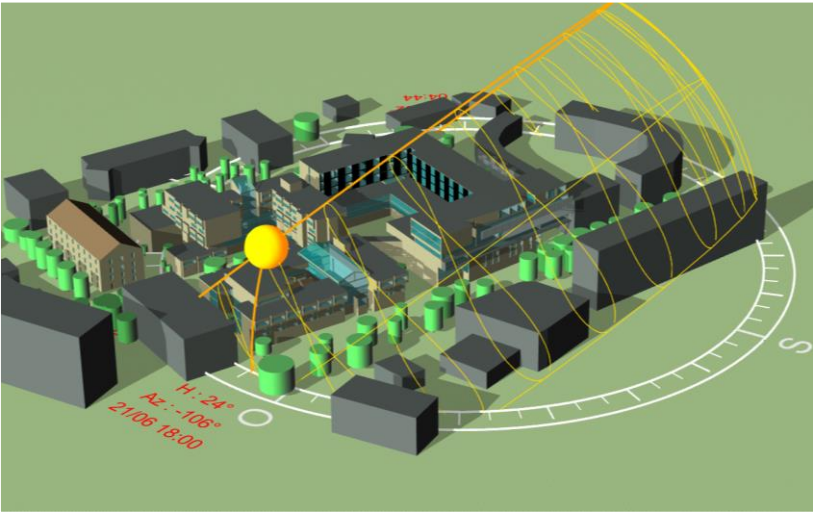
Climatisation	Production	Salle serveur Localisation : Façade Est	Détente directe : DAIKIN	2	2
		Crèche et logement de fonction Localisation : Façade Est	Détente directe 2 : ATLANTIC AOYG24LAT3	3	2
	Régulation terminale	Salle serveur, crèche et logement de fonction	Thermostat d'ambiance : Salle serveur : 21°C Crèche : 26°C (Hypothèse)	2	2
	Emission	Salle serveur crèche et logement de fonction	Ventilo-convecteur	2	2

Annexe 4

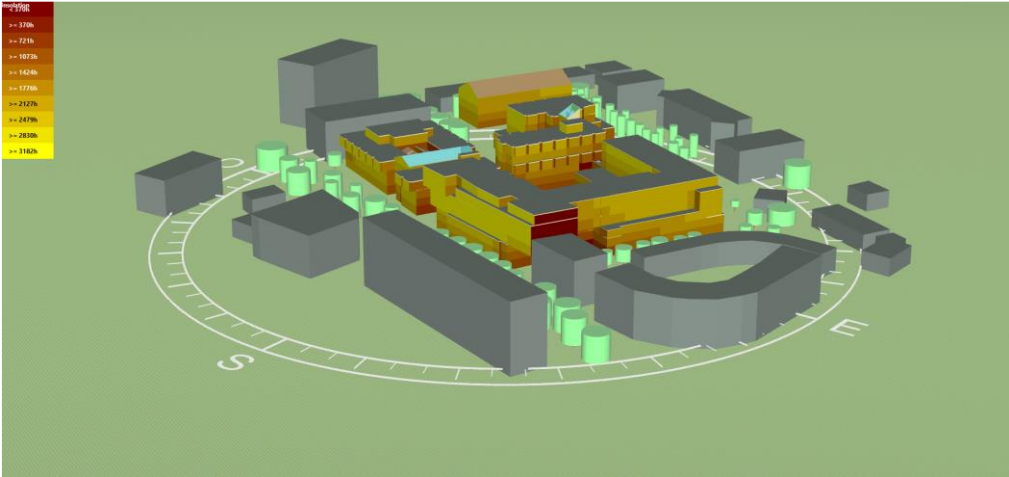
Ombres portées du site le 21 juin à 9h



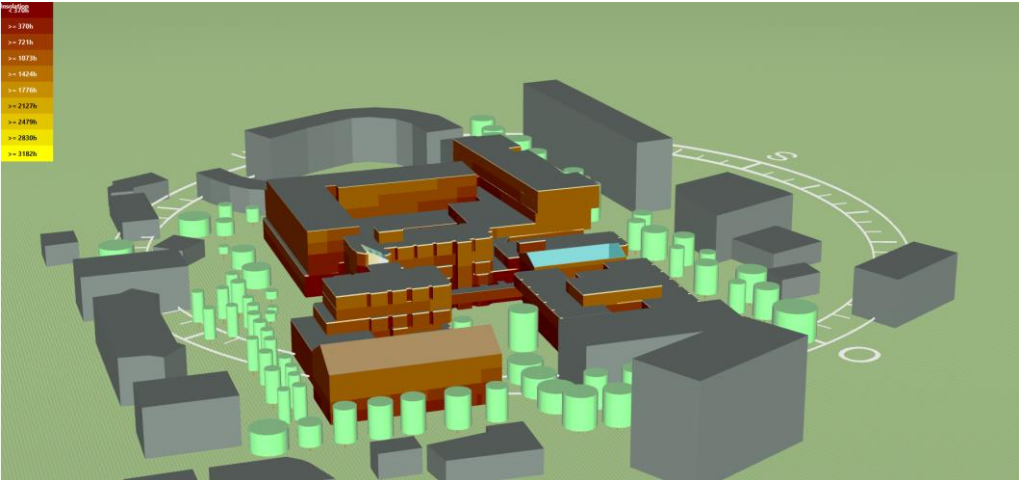
Ombres portées du site le 21 juin à 18h



Insolation des façades du site, orientation SE (Sud-Est)



Insolation des façades du site, orientation NO (Nord-Ouest)



Annexe 5

Script pour tracer les « Heat Map »

```
% Exemple de données de températures (à remplacer par les données de simulation)
temperature_data = randi([20, 40], 8760, 1); % Températures aléatoires entre 20°C
et 40°C

% Conversion des données en une matrice 2D (jours x heures)
temperature_matrix = reshape(temperature_data, 24, []);

% Définition des catégories et des couleurs correspondantes
categories_matrix = zeros(size(temperature_matrix));
colors_matrix = cell(size(temperature_matrix));

% Définition des plages de températures et des couleurs
for i = 1:size(temperature_matrix, 1)
    for j = 1:size(temperature_matrix, 2)
        if temperature_matrix(i, j) <= 26
            categories_matrix(i, j) = 1;
            colors_matrix{i, j} = 'vert';
        elseif temperature_matrix(i, j) > 26 && temperature_matrix(i, j) <= 28
            categories_matrix(i, j) = 2;
            colors_matrix{i, j} = 'jaune';
        elseif temperature_matrix(i, j) > 28 && temperature_matrix(i, j) <= 30
            categories_matrix(i, j) = 3;
            colors_matrix{i, j} = 'orange';
        else
            categories_matrix(i, j) = 4;
            colors_matrix{i, j} = 'rouge';
        end
    end
end

% Tracé de la figure avec les couleurs des catégories
figure;
imagesc(categories_matrix);
colormap([0 1 0; 1 1 0; 1 0.65 0; 1 0 0]); % Couleurs correspondant aux catégories
colorbar('Ticks',[1.5, 2.5, 3.5, 4.5],'TickLabels',{'Catégorie 1', 'Catégorie 2',
'Catégorie 3', 'Catégorie 4'});
title('Insérer le titre');
xlabel('Jour');
ylabel('Heure');
xticks(linspace(1, 365, 12)); % Ajustez les étiquettes de l'axe X si nécessaire
xticklabels({'Jan', 'Fév', 'Mars', 'Avr', 'Mai', 'Juin', 'Juil', 'Août', 'Sep',
'Oct', 'Nov', 'Déc'});
yticks(1:24);
yticklabels({'00h', '01h', '02h', '03h', '04h', '05h', '06h', '07h', '08h', '09h',
'10h', '11h', '12h', '13h', '14h', '15h', '16h', '17h', '18h', '19h', '20h', '21h',
'22h', '23h'});
c = colorbar;
c.Label.String = 'Catégories'; % Ajouter une étiquette à la barre de couleur

% Ajout des lignes pointillées pour délimiter chaque mois
for month = 1:12
    xline(month * 30.5 + 0.5, ':', 'LineWidth', 0.5, 'Color', 'black');
end

% Ajustement des limites de l'axe X pour zoomer sur les mois de juin, juillet, août
et septembre
xlim([151.5, 243.5]); % Jours de juin à septembre

% Ajustez la taille de la figure pour une meilleure lisibilité
set(gcf, 'Position', [100, 100, 800, 600]);
```

Script pour identifier la durée maximale des vagues de chaleur (seuil à 30°C)

```
% Exemple de données de températures horaire sur une année (à remplacer par les
données de simulation)
temperature_data = randi([20, 40], 8760, 1); % Températures aléatoires entre 20°C
et 40°C

% Seuil de température pour définir une période de chaleur
seuil_chaleur = 30; % définition à 30°C dans notre cas

% Trouver les indices des températures dépassant le seuil de chaleur
indices_chaleur = find(temperature_data >= seuil_chaleur);

% Initialisation des variables pour suivre la période de chaleur la plus longue
duree_max_chaleur = 0;
debut_max_chaleur = 0;
fin_max_chaleur = 0;

duree_chaleur = 0;
debut_chaleur = 0;

for i = 2:length(indices_chaleur)
    if indices_chaleur(i) == indices_chaleur(i - 1) + 1
        if duree_chaleur == 0
            debut_chaleur = indices_chaleur(i - 1);
        end
        duree_chaleur = duree_chaleur + 1;
    else
        if duree_chaleur > duree_max_chaleur
            duree_max_chaleur = duree_chaleur;
            debut_max_chaleur = debut_chaleur;
            fin_max_chaleur = indices_chaleur(i - 1);
        end
        duree_chaleur = 0;
        debut_chaleur = 0;
    end
end

% Gérer le cas où la dernière période est la plus longue
if duree_chaleur > duree_max_chaleur
    duree_max_chaleur = duree_chaleur;
    debut_max_chaleur = debut_chaleur;
    fin_max_chaleur = indices_chaleur(end);
end

% Afficher la durée de la période de chaleur la plus longue en heures
fprintf('Durée de la période de chaleur la plus longue : %d heures\n',
duree_max_chaleur);

% Afficher la plage de temps de la période de chaleur la plus longue
fprintf('De %d heures à %d heures\n', debut_max_chaleur, fin_max_chaleur);
```

Script qui compte le nombre de vagues de chaleur et qui calcule la durée moyenne

```
% Exemple de données de températures horaire sur une année (à remplacer par les
données de simulation)
temperature_data = randi([20, 40], 8760, 1); % Températures aléatoires entre 20°C
et 40°C

% Seuil de température pour définir une période de chaleur
seuil_chaleur = 30; % définition à 30°C dans notre cas

% Trouver les indices des températures dépassant le seuil de chaleur
indices_chaleur = find(temperature_data >= seuil_chaleur);

% Initialisation
durees_chaleur = []; %
duree_chaleur = 0;
```

```

nombre_vagues_chaleur = 0;

for i = 2:length(indices_chaleur)
    if indices_chaleur(i) == indices_chaleur(i - 1) + 1
        duree_chaleur = duree_chaleur + 1;
    else
        if duree_chaleur >= 2 % Si la période de chaleur dure au moins 2 heures
            durees_chaleur = [durees_chaleur, duree_chaleur];
            nombre_vagues_chaleur = nombre_vagues_chaleur + 1;
        end
        duree_chaleur = 0;
    end
end

% Ajouter la dernière vague de chaleur si sa durée est suffisante
if duree_chaleur >= 2
    durees_chaleur = [durees_chaleur, duree_chaleur];
    nombre_vagues_chaleur = nombre_vagues_chaleur + 1;
end

% Afficher le nombre de vagues de chaleur trouvées
fprintf('Nombre de vagues de chaleur trouvées : %d\n', nombre_vagues_chaleur);

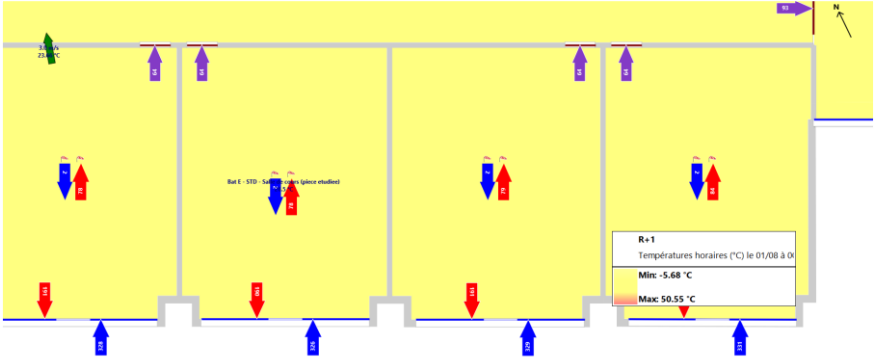
% Calculer la durée moyenne des périodes de chaleur
duree_moyenne_chaleur = mean(durees_chaleur);

% Afficher la durée moyenne des périodes de chaleur
fprintf('Durée moyenne des périodes de chaleur : %.2f heures\n',
duree_moyenne_chaleur);

```

Annexe 6

4 fiches intervention résumant les principaux points de chaque intervention mise en place

Mise en place d'une stratégie d'aération nocturne	
<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> > Solution ne nécessitant aucun/faible investissement > Permet un rafraichissement passif du bâtiment aux heures les plus fraîches de la journée. > Permet un débit de renouvellement d'air très élevé 	<p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> > Problématique de l'intrusion à considérer > Nécessite l'intervention manuelle d'une personne présente dans le bâtiment aux heures voulues ou l'intégration d'un système coûteuse d'ouverture automatique
<p>Détails :</p> <p><u>Mise en œuvre :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> > Cette préconisation consiste en l'ouverture manuelle des menuiseries par un agent de sécurité présent dans le bâtiment la nuit. > Elle ne nécessite pas de matériel ou d'investissements particuliers. En revanche, la personne doit passer dans tous les bureaux pour ouvrir les fenêtres. > Les volets sont considérés ouverts la nuit afin de maximiser le débit d'air neuf. <p><u>Performance :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> > Les fenêtres sont considérées ouvertes entre 20h et 10h en saison estivale 	
	
<p><i>Illustrations des débits présentés sur le modèleur</i></p>	
<p>Nota :</p> <ul style="list-style-type: none"> > Nous pouvons identifier trois stratégies de ventilation naturelle. De la moins performante à la plus performante : La ventilation mono-latérale, la ventilation traversante et la ventilation par tirage thermique (effet de cheminées). 	

Mise en place de brise-soleil orientables motorisés

Avantages :

- > Forte réduction des apports solaires
- > Efficace sur les orientations Sud, Est et Ouest
- > Dispositifs orientables permettant l'adaptation des occupants

Inconvénients :

- > Modification de l'image architecturale du bâtiment
- > Augmentation des consommations d'éclairage
- > Pilotage à prévoir
- > Investissement élevé

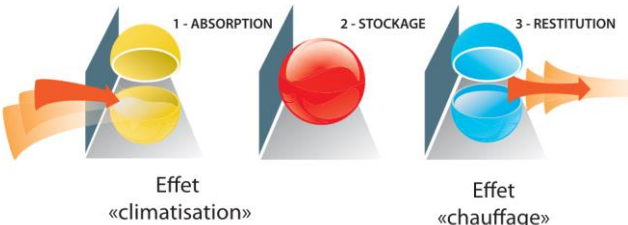

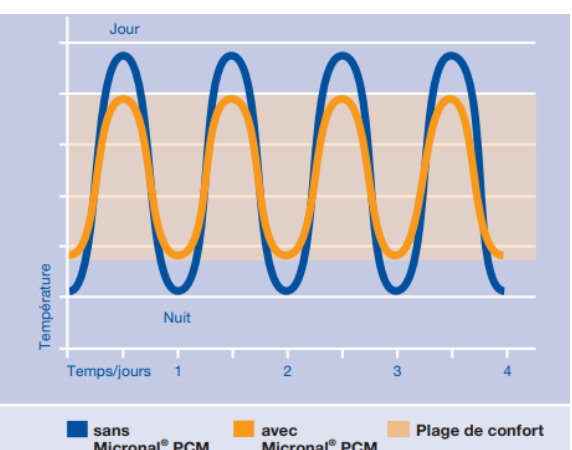
Détails :

Performance :

- > L'orientation des brise-soleils est horizontale
- > Performance intrinsèque du système : 90%.
- > Taux d'utilisation : 70%
- > Le pilotage des stores se fait via des commandes électriques.

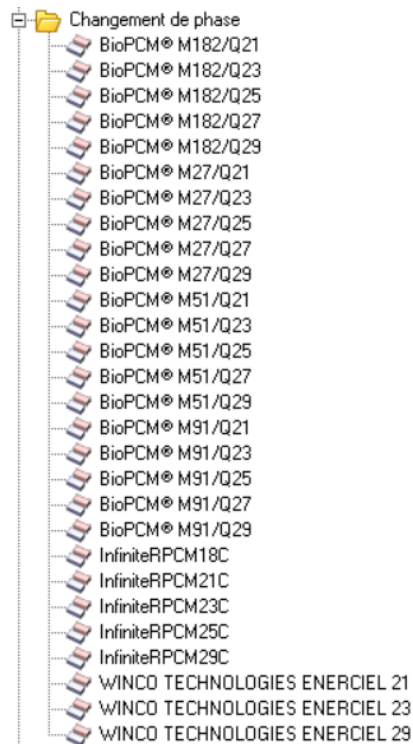


Mise en place d'une ventilation DF avec sur-ventilation nocturne	Estimation du coût												
	Sans objet												
<p><u>Avantages :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> > Solution exploitant le système de ventilation existant > Permet un rafraîchissement du bâtiment aux heures les plus fraîches de la journée. > Solution modulable, pouvant être mise en place seulement sur les semaines les plus chaudes de l'année. > Pas de contraintes liées aux intrusions 	<p><u>Inconvénients :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> > Consommation des auxiliaires de ventilation > Nécessite une inertie au moins moyenne > Limitation des débits de renouvellement d'air 												
<u>Détails :</u>													
<p><u>Mise en œuvre :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> > Installation des centrales de traitement d'air double flux. > Dépose/Repose des faux plafonds en circulation. > Mise en place d'un réseau de gaine. > Mise en place des alimentations électriques et protections. > Raccordements électriques et mise en service. > Mise en place de sortie d'air rejeté et d'une prise d'air neuf. > Programmation de la ventilation mécanique afin de dégager les calories du bâtiment en période nocturne <p><u>Performance :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> > Débit de renouvellement d'air en sur ventilation nocturne : 150 % du débit hygiénique > Période de sur-ventilation nocturne : 18h à 09h, de mi-juin à mi-septembre. <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>By-pass si :</td> <td>Durant la saison de chauffage</td> <td>Hors période chauffée</td> </tr> <tr> <td>Température extérieure ></td> <td><input type="text" value="20"/> °C</td> <td><input type="text" value="12"/> °C</td> </tr> <tr> <td>et température intérieure ></td> <td><input type="text" value="19"/> °C</td> <td><input type="text" value="24"/> °C</td> </tr> <tr> <td colspan="3">et température extérieure < température intérieure</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><i>Règle de by-pass CTA</i></p>		By-pass si :	Durant la saison de chauffage	Hors période chauffée	Température extérieure >	<input type="text" value="20"/> °C	<input type="text" value="12"/> °C	et température intérieure >	<input type="text" value="19"/> °C	<input type="text" value="24"/> °C	et température extérieure < température intérieure		
By-pass si :	Durant la saison de chauffage	Hors période chauffée											
Température extérieure >	<input type="text" value="20"/> °C	<input type="text" value="12"/> °C											
et température intérieure >	<input type="text" value="19"/> °C	<input type="text" value="24"/> °C											
et température extérieure < température intérieure													
<p><u>Nota :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> > Contrairement aux CTA, les réseaux de distribution ne sont pas surdimensionnés. Un niveau acoustique plus élevé hors occupation est accepté. 													

Mise en place de MCP (Matériaux à Changement de Phase)	Estimation du coût
	Enduit : 100 € HT/m ² (trois couches de 3 mm d'épaisseur, soit 9 mm) 20 € HT/kg d'enduit
	Panneaux : environ 35 à 50 € HT/m ² (selon fabricants)
Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> > Augmente l'inertie des parois > Particulièrement efficace sur les parois légères à faible inertie (ossatures bois) > Amélioration du confort d'été : amortissement des pics de températures > Mise en œuvre classique en construction 	<ul style="list-style-type: none"> > Peut rendre compliqué l'évacuation de la chaleur en l'absence de renouvellement d'air > Coût assez élevé > Etudes préalables sur le climat pour le choix adapté de la température de fusion > Mise en œuvre contrainte en rénovation
Détails : Il est particulièrement intéressant et conseiller de combiner cette intervention avec des actions portants sur le renouvellement d'air : aération nocturne, sur-ventilation nocturne, ...	
Caractéristiques :	
<ul style="list-style-type: none"> > Le choix de la température de fusion s'effectue en fonction du climat du projet et de l'objectif recherché : confort estival, confort hivernal, ... > Disponible classiquement sous forme d'enduit applicable sur une épaisseur d'environ 9 mm ou sous forme de panneaux d'environ 5 mm. > Le MCP microencapsulé brut peut aussi être intégré aux matériaux lors de leur mise en œuvre (béton, plâtre, ...) > Le matériau à changement de phase se caractérise globalement par une chaleur latente > 150 kJ/kg et une température de fusion comprise entre 18°C et 30°C (en fonction de l'usage souhaité) 	
	
	

Annexe 7

Bibliothèque DesignBuilder (gauche) et caractéristiques modifiables pour la définition de la courbe température /enthalpie sur DesignBuilder (droite)



Propriétés de Changement de Phase

Matériau à changement de phase

Méthode de changement de phase: 1-Basique

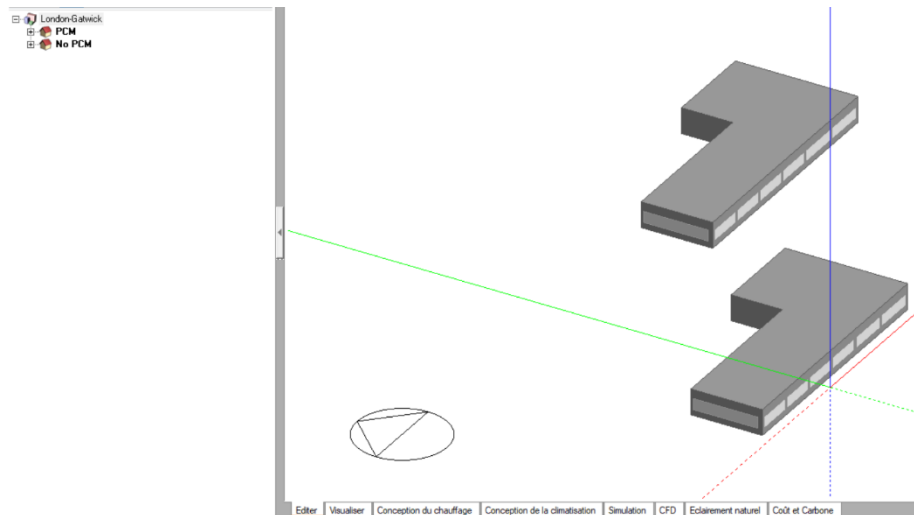
Coefficient de température (W/m-K2): 0,0000

Courbe Température - Enthalpie

Nombre de points de la courbe: 16

Point	Température (°C)	Enthalpie (J/kg)
Point 1	-20,00	1
Point 2	0,00	8
Point 3	10,00	19290
Point 4	15,00	27240
Point 5	20,00	36990
Point 6	23,00	42867
Point 7	24,00	56221

Template DesignBuilder (Batiment PCM & No PCM)



Caractéristiques générales de construction pour le bâtiment PCM & No PCM

Prédéfinition de construction	
Prédéfinition	BioPCM EXAMPLE
Construction	
Murs externes	BioPCM Wall Above-Grade - ASHRAE 90.1 2007 - Steel-Framed
Murs enterrés	Meilleure pratique Mur enterré, Poids moyen
Toiture terrasse	BioPCM M27Q25 Roof - ASHRAE 90.1 2007 - Insulation Entirely above
Toit incliné (occupé)	BioPCM M27Q25 Roof - ASHRAE 90.1 2007 - Insulation Entirely above
Toit incliné (inoccupé)	BioPCM M27Q25 Roof - ASHRAE 90.1 2007 - Insulation Entirely above
Cloisons internes	Lightweight 2 x 25mm gypsum plasterboard with 100mm cavity
Semi exposé	
Murs semi exposés	BioPCM Wall Above-Grade - ASHRAE 90.1 2007 - Steel-Framed
Plafond semi exposé	10mm Ceiling tiles
Plancher semi exposé	General energy code Plancher semi exposé, Léger
Planchers	
Plancher bas sur terrain	General energy code Plancher bas sur terrain, Léger
Plancher extérieur	General energy code Plancher extérieur, Léger
Plancher intermédiaire	10mm wooden floor

Prédéfinition de construction	
Prédéfinition	NoPCM EXAMPLE
Construction	
Murs externes	NoPCM Wall Above-Grade - ASHRAE 90.1 2007 - Steel-Framed
Murs enterrés	Meilleure pratique Mur enterré, Poids moyen
Toiture terrasse	NoPCM Roof - ASHRAE 90.1 2007 - Insulation Entirely above Deck
Toit incliné (occupé)	NoPCM Roof - ASHRAE 90.1 2007 - Insulation Entirely above Deck
Toit incliné (inoccupé)	NoPCM Roof - ASHRAE 90.1 2007 - Insulation Entirely above Deck
Cloisons internes	Lightweight 2 x 25mm gypsum plasterboard with 100mm cavity
Semi exposé	
Murs semi exposés	NoPCM Wall Above-Grade - ASHRAE 90.1 2007 - Steel-Framed
Plafond semi exposé	10mm Ceiling tiles
Plancher semi exposé	General energy code Plancher semi exposé, Léger
Planchers	
Plancher bas sur terrain	General energy code Plancher bas sur terrain, Léger
Plancher extérieur	General energy code Plancher extérieur, Léger
Plancher intermédiaire	10mm wooden floor