

Méthodologie pour la conception des matériaux architecturés appliqués au bâtiment et cahier des charges

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, l'état de l'art sur les *MCP* a permis d'identifier les familles potentiellement susceptibles d'être utilisées dans un système de stockage par chaleur latente pour le bâtiment. Les caractéristiques requises pour les matériaux afin de satisfaire nos objectifs imposent une recherche de multifonctionnalité, plus particulièrement de stockage et de puissance de restitution. La première fonction, le stockage, est remplie par l'intermédiaire des *MCP*. La deuxième fonction est satisfaite par l'intermédiaire des matériaux dits architecturés.

Mais quel est le meilleur choix parmi les familles proposées? Comment réaliser le choix de ces matériaux? Dans la littérature, diverses méthodes de sélection existent, notamment celle développée par Ashby et al. [10]. Cette méthode consiste à traduire le cahier des charges en indices de performance pour évaluer la performance de la solution. Nous proposons d'adapter cet outil de sélection au domaine du bâtiment.

Aussi, l'utilisation des matériaux architecturés dans le domaine du bâtiment appelle d'autres questionnements. Une architecture complexe est-elle nécessaire? Comment parvenir à l'optimiser? Une fois le classement des matériaux potentiels réalisé, la méthode doit alors être en mesure d'établir le chemin d'optimisation. Les lois d'homogénéisation de la littérature permettant d'obtenir les propriétés équivalente homogènes, les matériaux architecturés peuvent alors être comparés aux matériaux monolithiques.

Un ensemble d'outils, soit existants, soit à développer, pouvant être utilisés pour la conception d'un matériau sur mesure, a été identifié. La section 2.2 présente une méthodologie les mettant en œuvre et permettant la conception d'un matériau sur mesure dans le domaine du bâtiment. Le cahier des charges établi pour ce travail est abordé dans la

section suivante (section 2.3).

2.2 Top-down methodology

2.2.1 Description générale de la méthode

La figure 2.1 montre schématiquement la méthodologie développée lors de ce travail de thèse pour la conception des matériaux sur mesure et dénommée *Top-down Methodology*. Dans cette figure, trois échelles coexistent. La première d'entre elles est l'échelle de l'application à traiter, le bâtiment. Le principal objectif, à cette échelle, est de déterminer le cahier de charges du système de stockage qui satisfait la stratégie d'effacement du système de chauffage. La deuxième échelle est celle du système de stockage latent. Ici, l'objectif principal est d'obtenir des indicateurs de performances permettant l'évaluation du système de stockage. Enfin, la troisième échelle est celle des matériaux constituant le matériau solution. Le but principal, à cette échelle, est de déterminer l'architecture du matériau solution.

Notre travail consiste à établir des liens entre les différentes échelles pour ainsi obtenir un matériau sur mesure répondant efficacement à l'objectif donné. Deux étapes sont donc mises en évidence pour accomplir ce travail. À chaque étape, des outils numériques sont développés (si nécessaire) afin de réaliser le lien. Ces étapes sont l'objet d'une description détaillée dans les lignes qui suivent.

2.2.2 Première étape : Bâtiment → propriétés équivalentes homogènes

La conception d'un matériau optimal passe par l'adaptation du matériau à l'application souhaitée. Dans le cadre de cette thèse, cette application est un bâtiment résidentiel.

Le bâtiment est un environnement complexe. Non seulement par son interaction forte avec l'extérieur mais aussi par le très grand nombre de facteurs intervenant lors de sa conception et de son fonctionnement. Les avancées de l'informatique et le recueil d'un grand nombre d'informations pour la constitution d'une base de données (matériaux, climat, scénarios) ont permis le développement d'une grande variété de logiciels (*TRNSYS*, *Energy Plus*, *Codyba*, etc) simulant le bâtiment et son environnement en régime dynamique. Les systèmes dynamiques ne sont pas à l'équilibre : à tout instant, les températures des éléments d'étude peuvent varier en fonction des échanges thermiques (conduction, convection, rayonnement). L'arrivée de la simulation numérique en régime dynamique a permis d'estimer les consommations énergétiques en tenant compte de l'enveloppe du bâtiment, des systèmes énergétiques, de différents scénarios possibles (occupation, activité

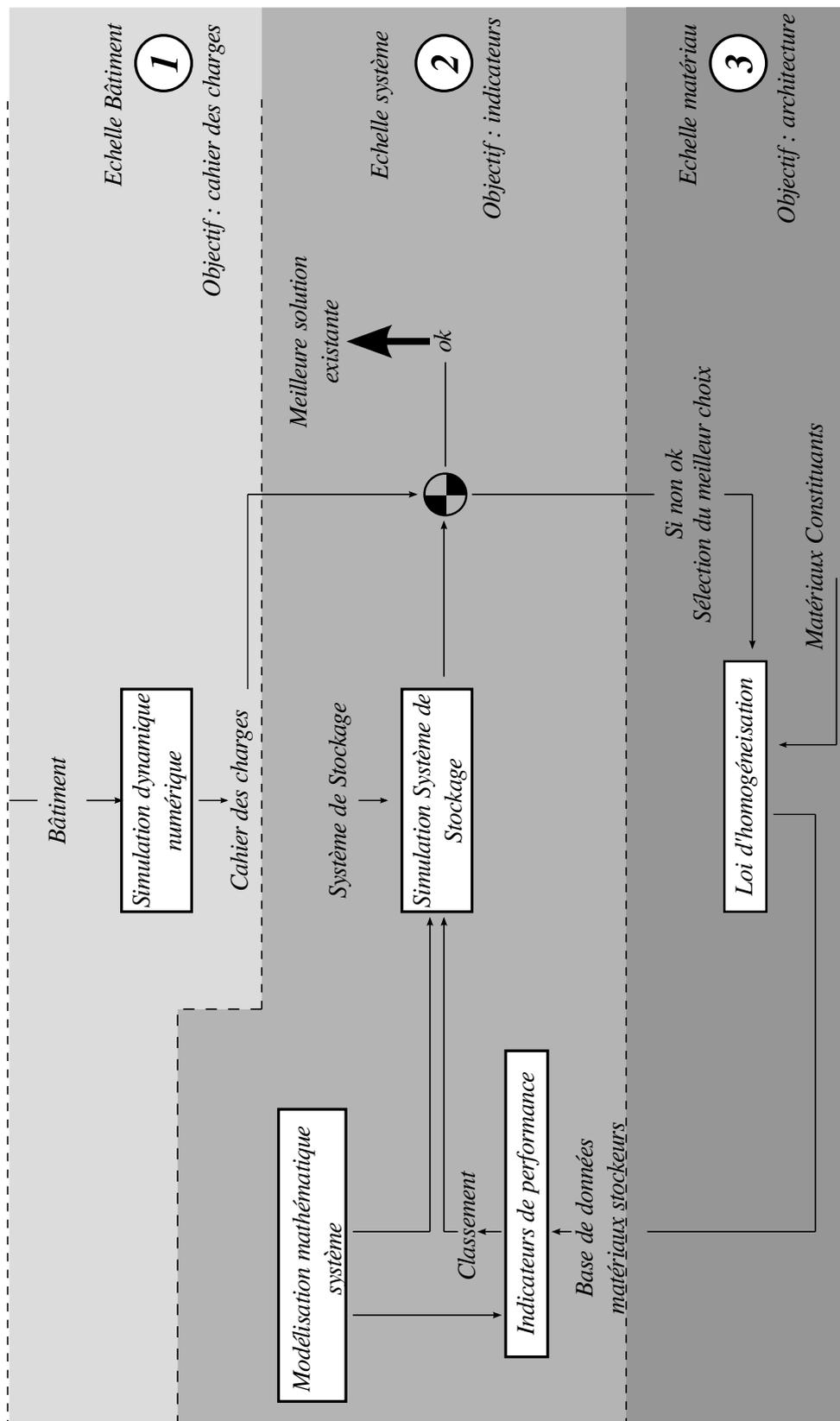


FIGURE 2.1 – *Top-down Methodology* pour la conception des matériaux architecturés dans le domaine du bâtiment. Les parties 1, 2 et 3 montrent les différentes échelles du problème

électrique, climat, ...).

La première étape de la méthodologie consiste à établir un lien entre l'objectif à satisfaire et les propriétés du système de stockage. Par rapport à notre objectif défini dans le chapitre précédent (section 1.1.2), la stratégie choisie pour réaliser le lissage des pics d'appel en puissance consiste en un effacement complet du système de chauffage pendant ces périodes de forte demande. Le cahier des charges de la solution proposée est défini à partir des simulations numériques réalisées sur l'application type retenue en utilisant le logiciel de simulation dynamique du bâtiment *TRNSYS*. Le critère choisi pour le cahier des charges est la puissance de décharge nécessaire pour réaliser l'effacement des pics d'appel en puissance.

Un outil numérique modélisant le système de stockage latent a été développé. Cet outil est en mesure de prendre en compte la principale caractéristique de nos matériaux potentiels : le changement de phase. L'analyse du système de stockage permet d'identifier des indicateurs de performance. Une évaluation du comportement du système de stockage peut être réalisée *via* ces indicateurs. Les indicateurs déterminés sont donc capables de fournir les propriétés matériaux et fonctionnelles du système de stockage nécessaires pour atteindre nos objectifs.

Le couplage entre ces deux outils permet donc d'établir une relation (*via* les indicateurs) entre les deux échelles en question, à savoir le bâtiment (échelle structure) et le matériau (échelle meso). Les indicateurs développés sont liés aux fonctions souhaitées de grande capacité de stockage et forte puissance de restitution et permettent la recherche d'un matériau optimal pour répondre au problème posé.

2.2.3 Deuxième étape : Propriétés équivalentes homogènes → Sélection/Conception d'un matériau optimal

La première étape permet l'analyse du système de stockage pour notre cas d'étude et la détermination des indicateurs.

Ces indicateurs sont utilisés pour établir une classification de matériaux existants potentiels. Les matériaux existants sont donc analysés pour savoir s'il en existe un qui réponde à notre objectif. Pour cela, les indicateurs liés à la capacité de stockage et à la puissance de restitution permettent d'établir une cartographie (Indicateur 1 vs. Indicateur 2) pour avoir une distribution des matériaux dans l'espace particulier qui nous intéresse. L'analyse réalisée au préalable fournit le couple d'indicateurs (Indicateur1, Indicateur2) de chaque matériau. Dans le cas de nos travaux, la maximisation des fonctions souhaitées (stockage et puissance) impose une minimisation des indicateurs. Les matériaux existants les plus proches du point (0,0) de l'espace étudié forment un front de Pareto (ensemble des solutions les plus performantes vérifiant le critère choisi, ici, la puissance de décharge).

Dans le cas où aucun matériau existant ne répond à notre cahier de charges, la cartographie permet de guider la recherche d'une solution optimale *via* l'optimisation des indicateurs. Les lois d'homogénéisation sont utilisées, pour déterminer l'architecture nécessaire. Deux cas de figure se présentent :

- soit la conductivité thermique requise n'est pas élevée, la matrice conductrice envisagée peut alors être construite avec des géométries simples.
- soit le besoin en conductivité thermique est important et la matrice conductrice doit être en mesure de répondre à cette objectif. L'architecture devient donc un paramètre d'optimisation utile.

Dans le premier cas, la quantité de matière est prépondérante (fraction volumique). Dans le deuxième cas, l'architecture doit être optimisée. Les travaux réalisés par Laszczyk [59] dans le cadre du CPR MAM présentent un outil numérique capable de rechercher la topologie optimale pour des panneaux architecturés. Les propriétés de chaque composant de notre matériau architecturé sont alors connues. Cependant, il se peut, que dans certains cas d'étude, le travail de sélection de matériaux et d'optimisation de l'architecture ne soient pas suffisants pour répondre à l'objectif imposé, même si ces outils fournissent le meilleur choix. Ceci nous oriente vers une optimisation du design de la solution proposée.

Afin d'appliquer cette méthodologie, la première étape est donc d'établir le cahier de charges pour le dimensionnement du système des stockage.

2.3 Cahier des charges pour la solution étudiée

2.3.1 Cadre de l'étude

L'objectif de cette section est de définir le cahier de charges pour le dimensionnement du système de stockage en fonction des besoins en chauffage d'un bâtiment type. Les simulations numériques ont été effectuées sous TRNSYS (pour *TRaNsient SYstem Simulation software* [53]).

2.3.2 Modélisation du bâtiment type

Le bâtiment type choisi pour cette étude est une maison individuelle (figure 2.2a). La maison individuelle étudiée est une maison témoin qui fait partie d'un site expérimental à l'échelle 1 : 1 développé par l'Institut National d'Énergie Solaire (INES) (pour plus d'informations, voir [21]). Cette maison individuelle est constituée de deux étages (zones aérauliques) sur vide sanitaire et sous combles de 110 m² habitables.

L'utilisation d'un système de stockage latent doit être accompagnée d'un effort sur l'isolation de l'enveloppe de la maison afin de réduire la consommation énergétique. En conséquence, l'étude se focalise sur des bâtiments performants pour la réduction de consom-

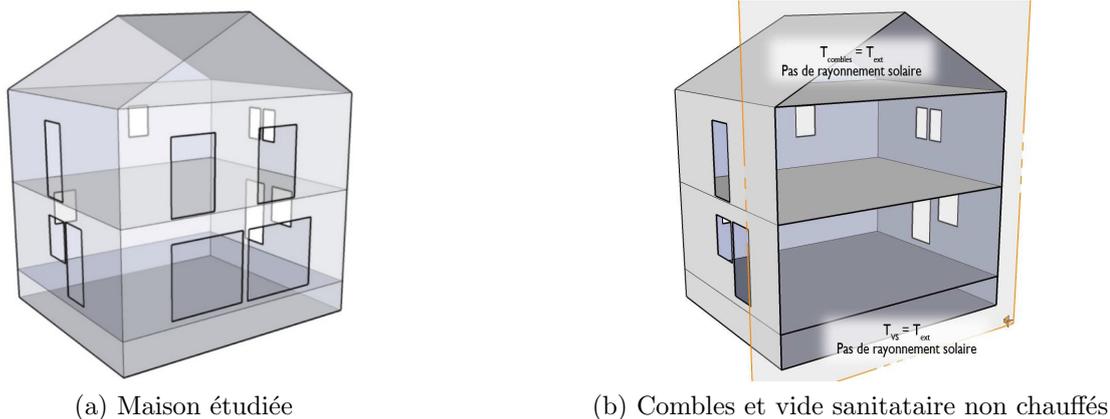


FIGURE 2.2 – Maison type à étudier

mation en énergie du type *BBC* (Bâtiment Basse Consommation). Ce label répond à des exigences définies dans un texte réglementé en 2007 (Arrêté du 8 mai 2007). La consommation d'énergie primaire de la maison (incluant les systèmes énergétiques et l'éclairage) doit être inférieure ou égale à $50 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2/\text{an}$.

Enveloppe

Les parois opaques de l'enveloppe de la maison ont une forte isolation réalisé avec de la laine de verre : 20 cm d'épaisseur sur les murs extérieurs, 25 cm sur le plancher et 40 cm au plafond. La composition des parois opaques est donnée dans le tableau 2.1. Les caractéristiques des matériaux qui composent les parois opaques sont données en annexe B.2. L'émissivité des parois opaques est fixée à 0.3 et le coefficient d'absorption à 0.6. Aussi, les coefficients de convection sont donnés ci dessous.

Plancher bas

- intérieur : $0.5 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$
- extérieur : $3.3 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$

Parois Verticales

- intérieur : $3.3 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$
- extérieur : $14.9 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$

Parois Vitrées

- intérieur : $3.3 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$
- extérieur : $14.9 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$

Plancher haut

- intérieur : $4.6 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$
- extérieur : $18.9 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$

Plancher intermédiaire

- intérieur : $4.6 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$
- extérieur : $1.8 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$

Par ailleurs, les parois vitrées sont en double vitrage argon de basse émissivité, très

Type de Paroi	Matériau	épaisseur (cm)
Murs ext.	Bloc de béton	15
	Laine de verre semi rigide	20
	Blocs de béton	15
Plancher Bas	Polystyrène extrudé	25
	Hourdis	16
	Béton lourd	4
Combles	Laine de verre semi rigide	40
	Plaque de plâtre	1.3
Plancher intermédiaire	Béton plein	22

TABLEAU 2.1 – Descriptif des parois opaques de la maison BBC

performantes (pour plus de détails voir annexe B.1).

Ventilation

La ventilation est de type double flux avec un rendement de 75 % pour la régénération de chaleur. Le débit de ventilation est supposé de 0.5 vol/h. Pendant la période estivale, la ventilation est du type simple flux avec une sur-ventilation de 4 vol/h pendant la nuit. D'autre part, le taux d'infiltration de la maison est supposé constant et égal à 0.042 vol/h. En fin, il est noté que le modèle ne comprend pas de refroidissement.

Apport internes

Trois apports internes principaux sont considérés : les occupants, les appareils électriques et l'éclairage.

La puissance totale dissipée par les appareils électriques et l'éclairage pendant la journée est donnée en annexe B.3. Le gain en énergie est donc de 1600 kWh par an. Cette consommation électrique correspond à des appareils du type *Classe A* (basse/ faible consommation).

D'autre part, il est considéré que la maison est occupée par une famille de 4 personnes. Deux personnes sont présentes entre 17 h et 18 h et 4 personnes entre 18 h et 8 h. Le reste du temps la maison est vide. La puissance émise par chaque personne étant de 80 W, l'apport total en énergie par an est de 1690 kWh.

Les apports sont répartis équitablement sur les deux étages.

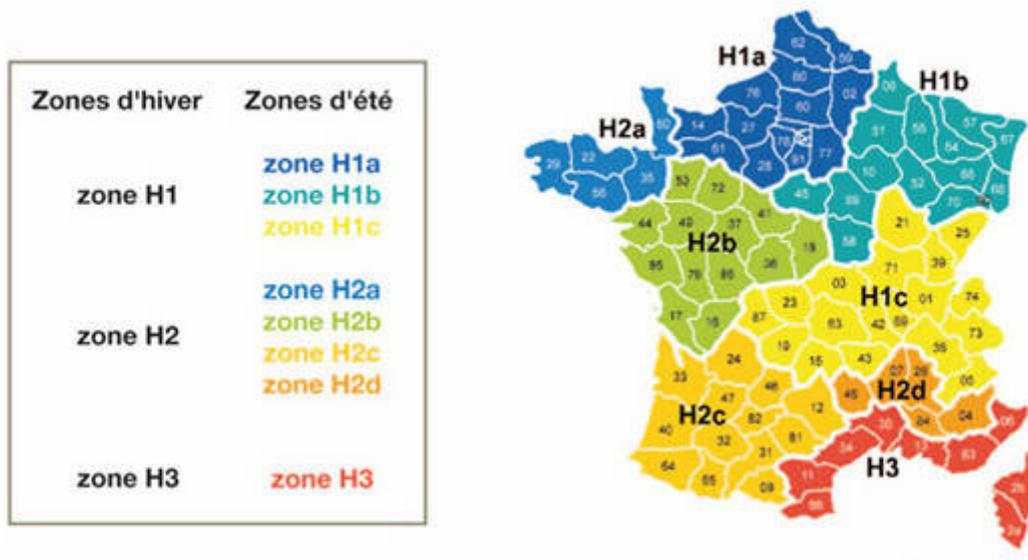


FIGURE 2.3 – Zones climatiques françaises

Température de consigne

La température de consigne est fixée à 19 °C pendant les périodes d'occupation. Cette valeur sera utilisée par la suite.

Conditions météorologiques

La maison est située dans la ville de Chambéry en Savoie. Les conditions météorologiques correspondent donc à la zone climatique H1c (figure 2.3). Le fichier météorologique est issu de Meteonorm et fournit des informations telles que la température extérieure, les flux solaires, etc. Les données sont fournies avec un pas horaire.

D'autre part, la période hivernale est comprise entre le 15 octobre et le 15 avril.

2.3.3 Besoin en chauffage pour la période hivernale

Les simulations numériques réalisées avec les hypothèses évoquées précédemment permettent d'estimer le besoin annuel en chauffage. Le tableau 2.2 est une synthèse des principaux résultats concernant cette analyse. La demande en puissance maximale de chauffage est constatée vers 8h du matin (pour un jour de janvier), moment le plus froid de la journée (figure 2.4).

L'étude se centre sur l'effacement de la demande en puissance de chauffage entre 18 h et 20 h. Le nombre de jours pour lesquels il est constaté que le chauffage est actif entre 18 h et 20 h pendant la période hivernale pour maintenir la température de consigne à 19 °C s'élève à 100. La figure 2.5 quantifie l'énergie nécessaire pour réaliser un effacement complet du système de chauffage. Pour satisfaire au critère de confort pour le créneau

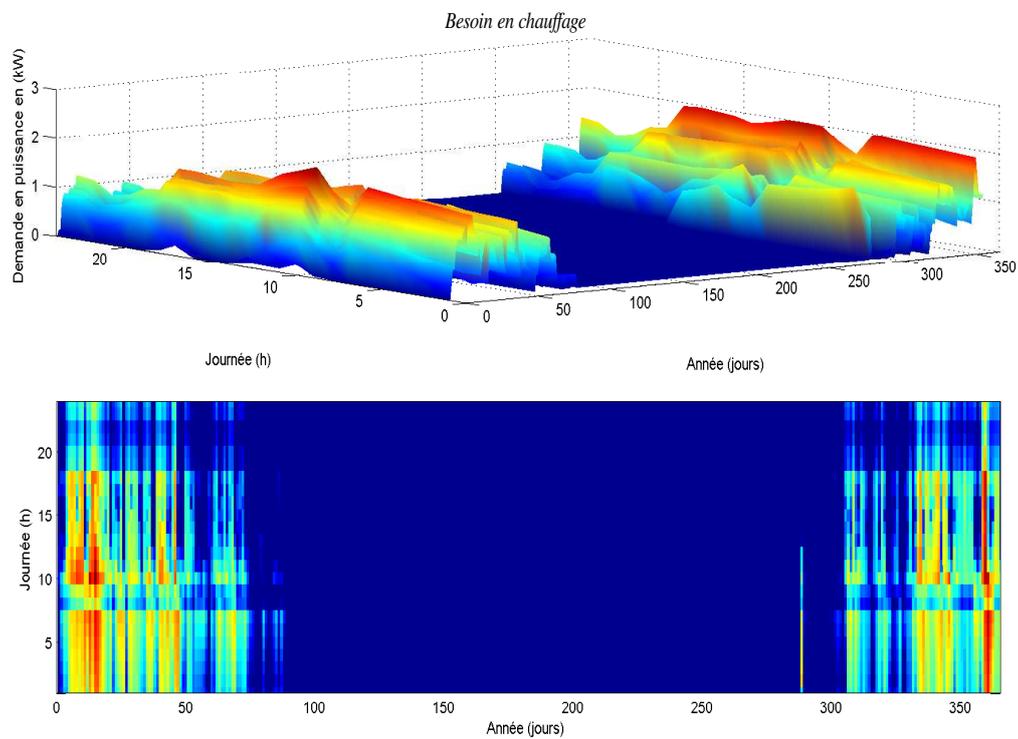


FIGURE 2.4 – Puissance nécessaire pour atteindre la température de consigne de 19 °C.

Consommation annuelle en chauffage	2305	kWh/an
Appel en puissance maximale	2	kW
Appel en puissance moyenne	0.5	kW

TABLEAU 2.2 – Principaux résultats numériques concernant le besoin en chauffage de la maison BBC

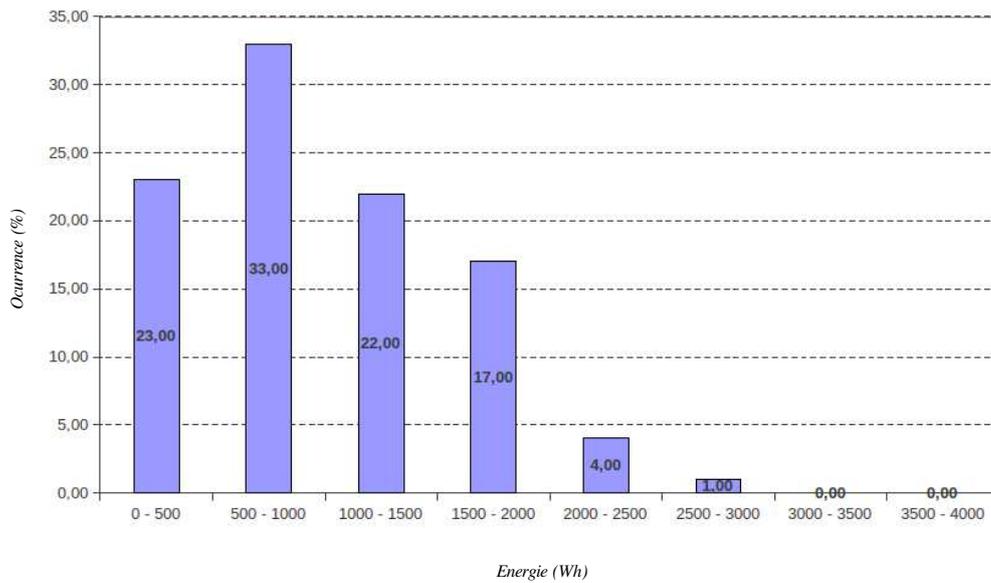


FIGURE 2.5 – Ocurrence du besoin en énergie pendant la période critique comprise entre 18h et 20h.

horaire étudié, la quantité d'énergie nécessaire pendant la période critique est de 3 kWh. Ceci implique une puissance de 1.5 kW. Néanmoins, pour assurer une réponse au critère de confort à n'importe quel moment, la stratégie retenue pour le dimensionnement du système de stockage a été définie en fonction de la puissance maximale constatée (2 kW). La quantité d'énergie stockée est donc de 4 kWh. Avec cette stratégie, le critère de confort est donc satisfait dans le créneau 18 h - 20 h.

2.3.4 Conclusion

Le travail réalisé sur la maison type a permis d'établir deux aspects importants du cahier des charges technique du système : la quantité d'énergie à stocker et la puissance de déstockage nécessaire pour satisfaire au besoin d'effacement du chauffage pendant la période critique de la courbe de charge (18 h - 20 h). La quantité d'énergie à stocker doit être de 4 kWh. En conséquence, la puissance nécessaire doit être supérieure ou égale à 2 kW pour assurer le déstockage de l'énergie emmagasinée.

2.4 Conclusions

Dans ce chapitre, une nouvelle méthodologie systématique dénommée *Top-down methodology* a été présentée. Cette méthodologie permet d'obtenir un matériau sur mesure pour la problématique posée concernant le domaine du bâtiment.

Les deux étapes principales de la méthodologie ont été présentées. La première étape consiste à relier l'échelle du bâtiment à celle du matériau équivalent homogène. Ce lien est établi en utilisant des indicateurs de performance et des outils numériques développés pour prendre en compte le phénomène de stockage par chaleur latente. L'optimisation de ces indicateurs permet d'obtenir les propriétés équivalentes homogènes optimales. La deuxième étape consiste à relier l'échelle du matériau homogène aux matériaux constituants. Les indicateurs de performance, couplés avec des lois d'homogénéisation, sont alors utilisés. Cette étude fournit le meilleur choix de matériau pour répondre à la problématique posée. L'avantage de cette méthode est le suivant : au cas où la solution proposée n'atteint pas l'objectif défini (en étant le meilleur choix), elle permet une optimisation du design *via* les indicateurs liés aux paramètres fonctionnels. Cette approche méthodologique permet d'établir un lien entre la problématique et la solution malgré les différentes échelles rencontrées lors de la recherche d'une solution optimale. La solution proposée est donc sur mesure.

La section précédente a présenté l'analyse à l'échelle de la structure pour l'obtention du cahier des charges du système de stockage par chaleur latente. Ce cahier des charges a été établi à partir des simulations dynamiques du bâtiment type choisi. Les valeurs obtenues pour un effacement complet du chauffage pendant la période de forte demande de la journée est d'une puissance d'au moins 2 kW afin de stocker 4 kWh d'énergie.

Les chapitres suivants sont consacrés à l'application de la méthodologie présentée.