

Dimensionnement du stockage thermochimique pour le Bâtiment Basse Consommation

5.1. Préambule

5.1.1. Concept général

5.1.2. Cadre de l'étude

5.2. Présentation du système

5.2.1. L'environnement de simulation

5.2.2. Le bâtiment : la maison INCAS

5.2.3. Besoins en chaleur pour le chauffage

5.3. Gestion du stockage thermique au cours de la décharge

5.3.1. Les périodes de pointes

5.3.2. Scénarios de décharge retenus

5.3.3. Demande en chaleur en période de pointe

5.4. Dimensionnement du système de stockage

5.4.1. Estimation de la quantité d'eau disponible

5.4.2. Dimensionnement du réacteur de stockage

5.5. Conclusion

5.1. Préambule

5.1.1. Concept général

Le principe du stockage thermique développé au cours de cette thèse repose sur un système ouvert couplé au système de ventilation mécanique du bâtiment. En hiver, période de déstockage de chaleur, l'air extrait est utilisé comme source d'humidité pour alimenter le phénomène exothermique de sorption dans le réacteur. L'énergie thermique générée par la réaction est ensuite utilisée pour chauffer l'air neuf entrant via un échangeur de chaleur, permettant ainsi de chauffer l'habitat. La Figure 5.1 (a) fournit une vision schématisée du processus de décharge.

En période estivale, le stockage de la chaleur dans le matériau composite requiert un débit d'air chaud à une température de l'ordre de 80°C à 150°C (Figure 5.1 (b)). Cet air chaud est fourni par des capteurs solaires thermiques. La quantité d'énergie emmagasinée est d'autant plus importante que la température est élevée, d'où le recours à des capteurs solaires thermiques à air performants (tubes sous vide).

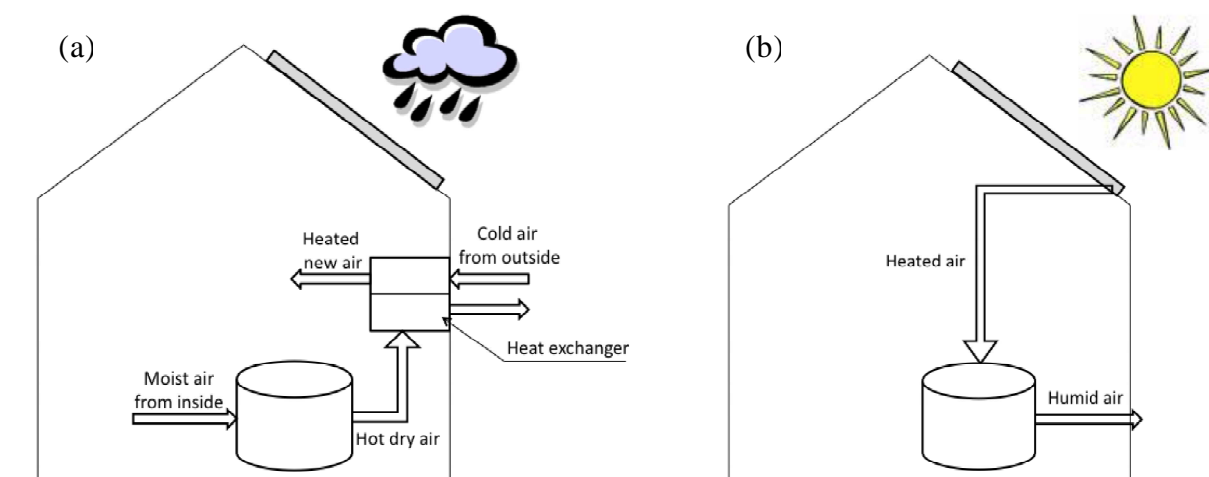


Figure 5.1 : Présentation du concept : (a) stockage de chaleur l'été, (b) décharge de chaleur l'hiver (Hongois et al., 2011)

Outre le caractère novateur du matériau de stockage, la particularité majeure du système réside dans la méthode d'intégration au bâtiment, fondée sur un couplage du stockage thermique couplé au système de ventilation mécanique et l'utilisation du vecteur air pour le chauffage du bâtiment et la régénération du stockage.

5.1.2. Cadre de l'étude

L'intégration du stockage thermochimique au bâtiment a été étudiée dans le cadre d'une maison individuelle. L'objectif est de dimensionner le système en fonction des besoins en chauffage d'une Bâtiment Basse Consommation. A cet effet, des simulations annuelles ont été réalisées sous TRNSYS. Après la présentation de

l'environnement de simulation, les caractéristiques du bâtiment et les hypothèses de simulation seront décrites. La stratégie adoptée pour la décharge du système sera ensuite exposée. Si dans sa globalité, le principe demeure inter-saisonnier, avec une unique phase de charge effectuée en période estivale, divers modes de décharges ont été envisagés en vue d'optimiser la gestion du système. On découvrira alors le rôle déterminant du stockage de chaleur en période de pointes hivernales.

La conception modulaire du réacteur de stockage suppose un dimensionnement à partir des performances d'une quantité unitaire de matériau. Lors d'études précédentes, un module de 5 kg (7 L) de composite ZM15 a été caractérisé en charge et en décharge (cf. chapitre 4, partie 4.3. *Expérimentation à grande échelle*). La dernière phase de l'étude consistera ainsi à évaluer la taille du système en confrontant les besoins en chaleur du bâtiment à ces données expérimentales.

5.2. Présentation du système

5.2.1. L'environnement de simulation

5.2.1.1. Présentation de TRNSYS

Outil de référence au niveau mondial dans le domaine de la simulation dynamique des bâtiments et des systèmes énergétiques, TRNSYS (*TRaNsient SYstem Simulation program*) est le fruit d'une collaboration internationale entre divers organismes :

- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), basé à Sophia-Antipolis (France)
- le *Solar Energy Laboratory* (SEL) dépendant de l'Université du Wisconsin-Madison (Etats-Unis)
- le Transsolar Energietechnik GmbH de Stuttgart (Allemagne)
- l'institut *Thermal Energy Systems Specialists* (TESS) de Madison (Etats-Unis).

TRNSYS est un logiciel particulièrement adapté à la simulation en régime dynamique du comportement thermique des bâtiments multi-zone et des systèmes associés. De par sa structure modulaire, il permet de décrire des systèmes complexes, à l'aide des nombreux composants (les *types*) inclus dans sa bibliothèque. L'environnement TRNSYS comprend deux sous-programmes :

- l'atelier *TRNSYS Simulation Studio*, structure d'accueil permettant à la fois le développement de nouveaux modèles numériques et l'exécution de simulations dynamiques
- l'interface *TRNBUILD*, qui permet de définir de la structure de l'enveloppe du bâtiment.

5.2.1.2. Architecture du système sous TRNSYS

Les simulations sous TRNSYS sont effectuées sur une année complète avec un pas de temps horaire. Le système modélisé comprend les principaux éléments suivants (Figure 5.2) :

- le bâtiment multi-zone (type 56)
- les données météorologiques (type 109)
- un lecteur de données (type 9a), lié aux plannings d'occupation, de ventilation et de commande de la consigne de chauffage
- un régulateur de gestion de l'éclairage du bâtiment (type 2)
- divers modules de calcul et d'intégration, destinés à l'évaluation de grandeurs utiles à l'analyse, telles que la température moyenne extérieure ou les besoins mensuels en chaleur pour le chauffage.

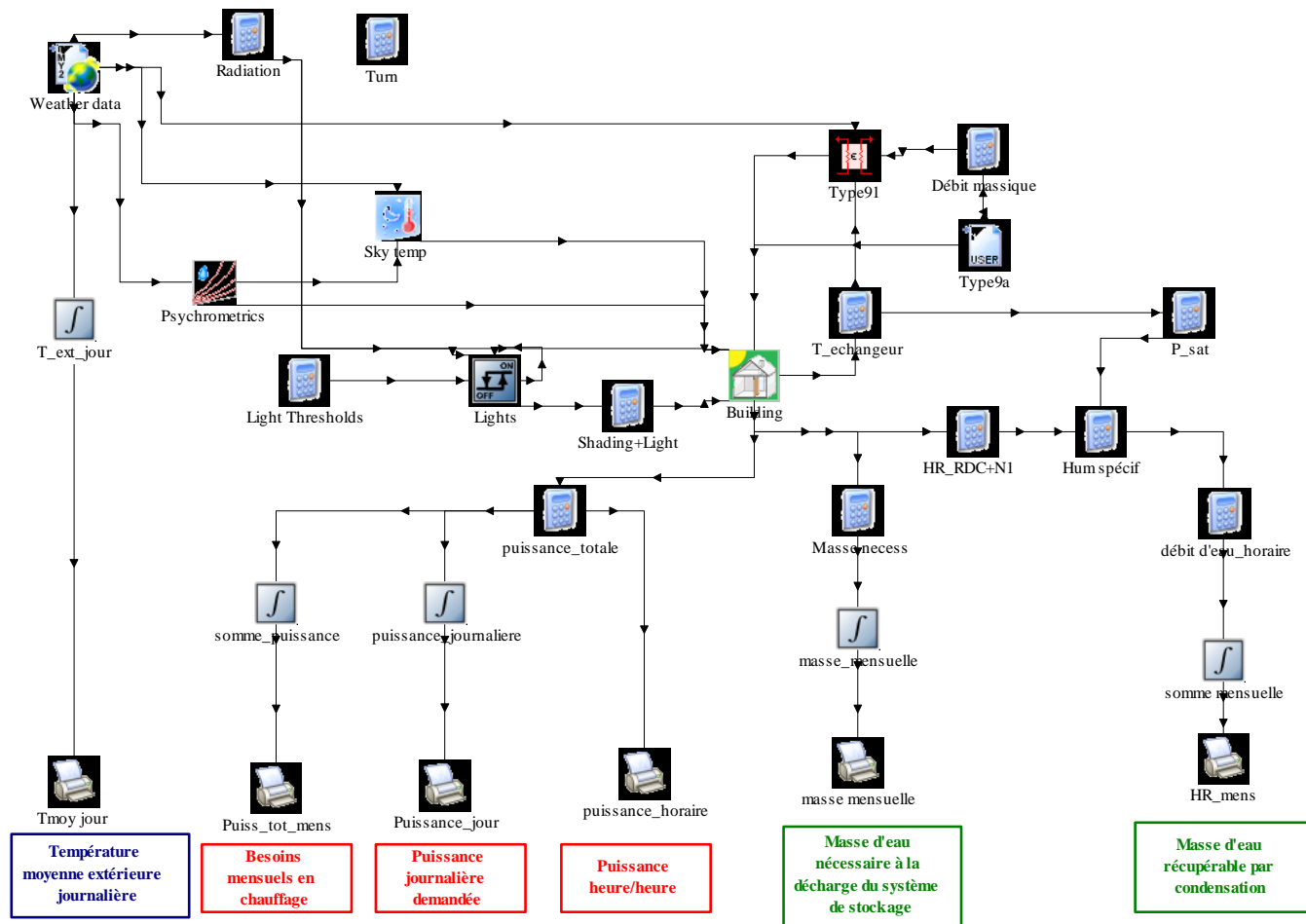


Figure 5.2 : Le système dans l'environnement TRNSYS

Le type 56 est le composant le plus complexe du modèle, puisqu'il rassemble à lui seul toutes les caractéristiques du bâtiment : architecture, composition et orientation des parois, intensité des infiltrations, etc. Sa description sera détaillée dans la partie suivante.

5.2.2. Le bâtiment : la maison INCAS

5.2.2.1. Présentation générale

Créée par l'Institut National de l'Energie Solaire (INES), la plate-forme de test INCAS est dédiée au développement d'habitations à énergie positive et basse consommation. Cet outil expérimental vise à caractériser à l'échelle 1 de nouvelles technologies solaires en environnement réel. A cette fin, la construction de quatre maisons expérimentales est prévue à Chambéry, en faisant appel à différents modes de construction et d'isolation (murs en parpaing ou en béton, isolation par l'intérieur ou l'extérieur, ossature bois...). Au sein de cette étude, une large part est accordée à la modélisation de la maison individuelle témoin (Brun et al., 2009).

La maison INCAS comprend 98 m² habitables répartis sur deux niveaux (Figure 5.5.3). Avec 34% de la surface vitrée orientée sud, l'exposition du bâtiment est étudiée dans le but de profiter au maximum des apports solaires gratuits.



Figure 5.5.3 : La maison INCAS – Aperçu (Brun et al., 2009)

D'un point de vue aérodynamique, le modèle est constitué de deux zones indépendantes, l'une correspondant au rez-de-chaussée, l'autre correspondant à l'étage (Figure 5.4).

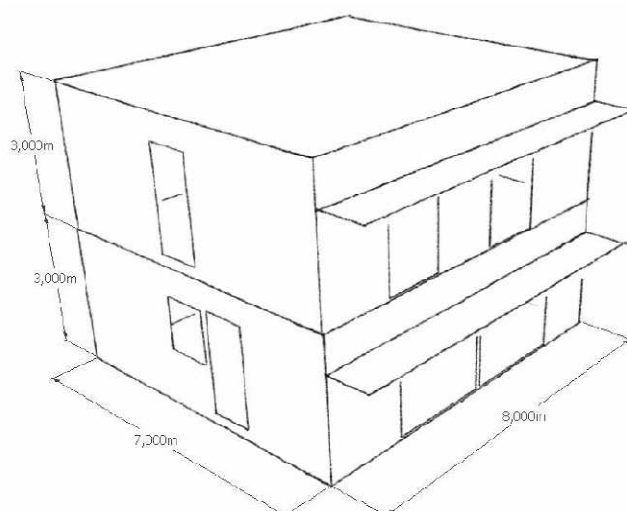


Figure 5.4 : La maison INCAS – Géométrie

L'investissement dans une technologie aussi sophistiquée qu'un stockage thermique de longue durée paraît difficilement concevable sans consentir au préalable des efforts au niveau de l'isolation thermique du bâtiment, afin de réduire sa consommation énergétique. En partant de ce constat, l'étude s'est naturellement dirigée vers un bâtiment économe en énergie de type Bâtiment à Basse Consommation (BBC).

Mis en avant par le Grenelle de l'Environnement comme objectif d'ici 2012 pour les bâtiments neufs, le label BBC correspond à un ensemble d'exigences réglementaires définies par l'arrêté ministériel du 8 mai 2007. Conformément à la Réglementation Thermique 2005 (RT 2005), ce label est définie par une consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment inférieure ou égale à $50(a+b)\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. Cette consommation, comprenant le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) et

l'éclairage des locaux, est pondérée selon les régions, à l'aide du coefficient de rigueur climatique a et d'un coefficient b , traduisant l'influence de l'altitude.

5.2.2.2. Composition des parois

La composition des murs, des planchers et des plafonds du bâtiment est détaillée dans le Tableau 5.1. Les émissivités des parois sont fixées à 0.30 et les coefficients d'absorption (intérieurs et extérieurs) à 0.60. Un accent fort est mis sur l'isolation, avec une couche d'isolant de 20 cm d'épaisseur sur les murs extérieurs, 25 cm sur le plancher du rez-de-chaussée et 40 cm au niveau du plafond des combles.

Type de paroi	Nature du matériau	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Mur extérieur (épaisseur : 50cm)	Blocs béton	15	0.74	800	648
	Laine de verre semi-rigide	20	0.035	12	840
	Blocs béton	15	0.74	800	648
Plancher bas (épaisseur : 45 cm)	Polystyrène extrudé	25	0.029	15	880
	Hourdis	16	1.23	1300	648
	Béton lourd	4	1.75	2400	880
Combles (épaisseur : 41.3 cm)	Laine de verre semi-rigide	40	0.035	12	840
	Plaque de plâtre	1.3	0.32	850	799
Plancher intermédiaire (épaisseur : 22 cm)	Béton plein	22	1.75	2400	880

Tableau 5.1 : Compositions des parois

Les coefficients d'échange convectifs au niveau de chaque parois sont considérés comme constants (Tableau 5.2).

Plancher bas	Plancher haut	Parois verticales	Parois verticales vitrées	Plancher intermédiaire
$h_{int} = 1.78$	$h_{int} = 4.59$	$h_{int} = 3.29$	$h_{int} = 3.29$	$h_{plafond} = 4.59$
$h_{ext} = 3.33$	$h_{ext} = 18.9$	$h_{ext} = 14.9$	$h_{ext} = 14.9$	$h_{plancher} = 1.78$

Tableau 5.2 : Coefficients d'échange convectif des parois

La maison est munie de double vitrage argon peu émissif, qui compte parmi les technologies les plus performantes du marché. Les caractéristiques des menuiseries sont recensées dans le Tableau 5.3.

Vitrage extérieur	Epaisseur	6 mm
	Emissivité extérieure	0.837
	Emissivité intérieure	0.837
	Transmission solaire	0.784
	Réflectance extérieure	0.071
	Réflectance intérieure	0.071
	Conductivité thermique	$1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Argon	Epaisseur	16 mm
	Conductivité thermique	$0.0163 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
	Chaleur spécifique	$521.9 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
	Masse volumique	1.78 kg.m^{-3}
Vitrage intérieur	Epaisseur	6 mm
	Emissivité extérieure	0.103
	Emissivité intérieure	0.837
	Transmission solaire	0.571
	Réflectance extérieure	0.229
	Réflectance intérieure	0.156
	Conductivité thermique	$1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Cadre	Coefficient de déperdition thermique U	$1.3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
	Fraction de cadre	15%
	Absorptivité	90%

Tableau 5.3 : Caractéristiques détaillées des menuiseries

Les plans détaillés des façades de la maison, illustrant notamment la disposition et les dimensions des ouvertures, sont disponibles en annexe A.

5.2.2.3. Apports internes

Les apports thermiques internes, liées à la présence humaine dans le bâtiment et à l'utilisation d'appareils électriques, ont une influence non négligeable sur la consommation énergétique du bâtiment. La présence humaine est modélisée via un scénario d'occupation. Ce dernier correspond à une famille de 4 personnes, ayant une activité extérieure chaque jour de la semaine :

- 2 personnes sont présentes de 17 heures à 18 heures
- 4 personnes sont présentes de 18 heures à 8 heures.

En considérant un dégagement de chaleur sensible de 80W par personne, les gains thermiques annuels liés aux occupants s'élèvent à 1690 kWh. Le modèle adopté suppose que cette puissance est uniquement d'origine convective.

La maison est équipée d'appareils d'électroménager, d'audiovisuel, d'informatique et d'éclairage très performants (classe A, ampoules à basse consommation...). Sous cette hypothèse, un planning de puissance dissipée est établi (Figure 5.5). Ce

scénario aboutit à des apports annuels de 1600 kWh. Ici encore, la puissance est uniquement d'origine convective. Par ailleurs, la puissance totale associée aux gains thermiques internes est équitablement partagée entre le rez-de-chaussée et l'étage.

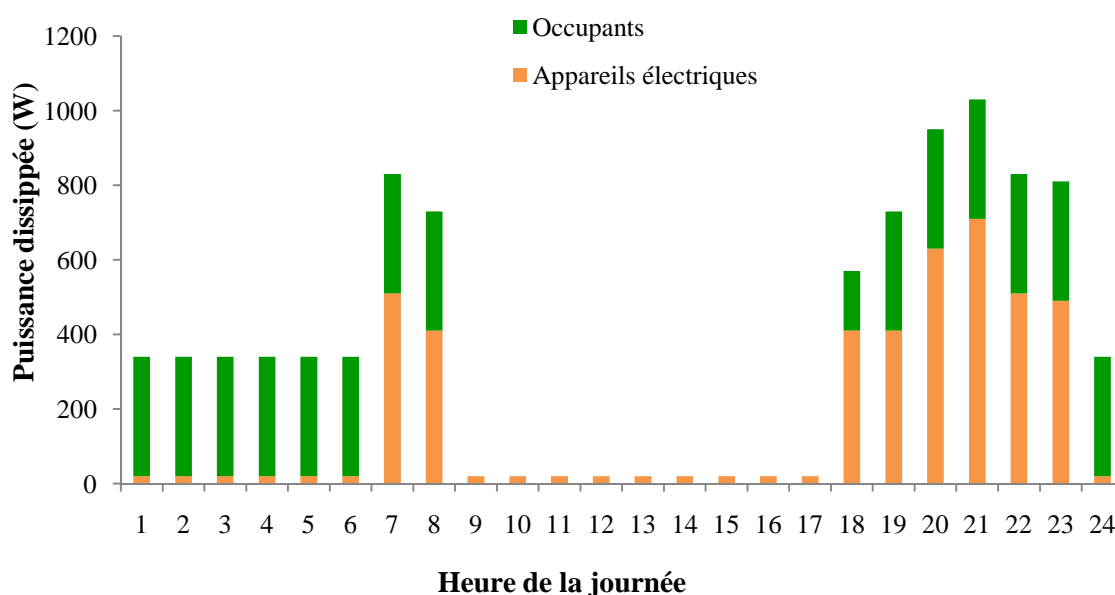


Figure 5.5 : Apports internes liés aux occupants et à l'utilisation d'appareils électriques

5.2.2.4. Ventilation

La ventilation est un paramètre crucial dans l'analyse du comportement thermique global du bâtiment. Son influence est d'autant plus forte que le bâtiment est très isolé. Dans notre cas, la ventilation mécanique est assurée par un système à double flux, avec un débit de 0.5 vol.h^{-1} et un rendement de 0.75. Un débit supplémentaire, dû aux infiltrations d'air, est pris en compte ; il est supposé constant et égal à 0.042 vol.h^{-1} .

En période estivale (mois de juin, juillet et août), le système de ventilation double flux est désactivé. En lieu et place, une surventilation nocturne de 4 vol.h^{-1} est appliquée de 22h à 7h ; le reste de la journée, le débit est fixé à une valeur de 0.542 vol.h^{-1} .

5.2.2.5. Sources d'humidité

Les sources de production de vapeur d'eau dans une maison sont nombreuses. L'humidité provient essentiellement des occupants, via la respiration et la transpiration, et de leurs activités (douche, bains, cuisine...). Quelques taux moyen de production de vapeur d'eau en kg.h^{-1} sont répertoriés dans le Tableau 5.4.

Sources d'humidité		Production de vapeur d'eau horaire (kg.h ⁻¹)	Production de vapeur d'eau journalière (kg.jour ⁻¹)
Occupants	Respiration et transpiration	0.05	2.90
Activités humaines	Douche	2.6	1.47
	Cuisine	0.48	0.48

Tableau 5.4 : Sources d'humidité et taux moyen de production de vapeur d'eau, d'après (TenWolde and Pilon, 2007)

Le mode de stockage de chaleur mis au point au cours de cette thèse, reposant sur un phénomène de sorption/désorption de vapeur d'eau, prévoit l'utilisation de la vapeur d'eau issue de l'habitat pour alimenter le réacteur thermochimique durant la saison de chauffage. Par conséquent, l'identification des sources d'humidité et l'évaluation de la quantité d'eau disponible au sein du bâtiment sont des paramètres clés dans le dimensionnement du système. Les taux moyens de production liés aux activités humaines, telles que la douche ou la cuisine, sont donnés à titre indicatifs. En réalité, bien d'autres facteurs pourraient augmenter le bilan ; par exemple, la présence de plantes ou le séchage du linge sont également génératrices d'humidité. A ce stade des travaux, les simulations prennent en uniquement considération la part de vapeur d'eau issue de la respiration et de la transpiration des occupants. Les quantités d'eau évaluées constituent donc un minimum.

Dans le cadre de cette étude, une réflexion approfondie a été menée au sujet de la quantité de matériau de stockage nécessaire à la couverture des besoins en chaleur hivernaux pour le chauffage, au détriment de la modélisation fine du comportement thermo-hygrique du bâtiment. La représentation rigoureuse des transferts couplés thermo-hygro-aérauliques mis en jeu dans le bâtiment nécessiterait une véritable étude de fond mettant en œuvre, par exemple, un modèle de type tampon hygroscopique. Ici, l'étude se limitera à l'introduction des taux de production d'humidité dans TRNSYS, en vue d'estimer la quantité d'eau globale disponible dans l'air extrait de l'habitat.

5.2.2.6. Données météorologiques

La Règlementation Thermique 2005 (RT 2005) répartit la France en 8 zones climatiques, regroupées en trois zones *hiver* (H1, H2 et H3) et quatre zones *été* (a, b, c et d). L'objectif étant de dimensionner un système de chauffage, une attention particulière a été portée sur les zones *hiver*. Les zones H1, H2 et H3 sont définies en fonction des consommations maximales en énergie primaire Cep_{max} , incluant le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'ECS et l'éclairage (Tableau 5.5).

Zone climatique	Chauffage à combustible fossiles (kWh _{ep} .m ⁻² .an ⁻¹)	Chauffage électrique, pompes à chaleur comprises (kWh _{ep} .m ⁻² .an ⁻¹)
H1	130	250
H2	110	190
H3	80	130

Tableau 5.5 : Définition des zones climatiques selon la RT2005 – Consommation maximale en énergie primaire $C_{ep,max}$ (www.effinergie.org)

En vue d'adapter la taille du système de stockage thermique à la région d'implantation, trois sites géographiques sont sélectionnés (Figure 5.6) :

- un site en plaine, Trappes (zone H1)
- un site en montagne, Chambéry (zone H1)
- un site méditerranéen, Marseille (zone H3).

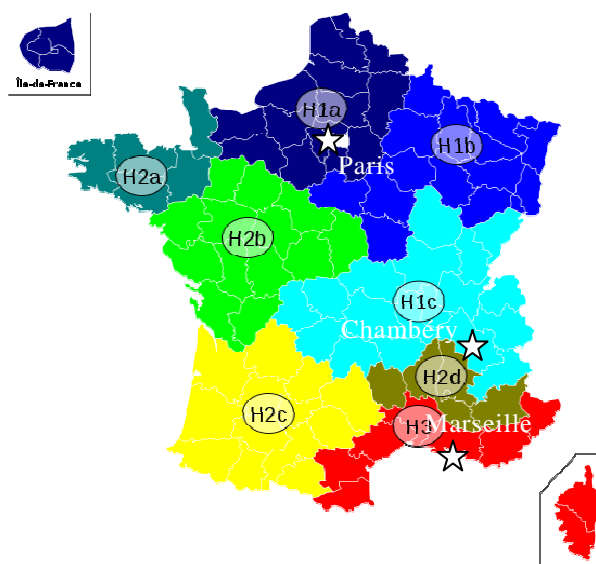


Figure 5.6 : Carte des zones climatiques en France selon la RT 2005 (www.effinergie.org)

Les données climatiques de ces trois sites sont représentées dans l'environnement TRNSYS par le type 109. Ce composant permet de lire les fichiers météorologiques, contenant des données telles que la température ambiante, la vitesse du vent, ou la radiation solaire incidente.

5.2.3. Besoins en chaleur pour le chauffage

Le système de chauffage du bâtiment est supposé idéal et sa puissance infinie. Celle-ci est dissipée exclusivement sous forme convective. La température de consigne est fixée à 19°C. Aucun système de rafraîchissement n'étant installé, l'évolution de la température est libre au-delà de cette température.

L'analyse des besoins en chaleur en fonction des régions peut se baser sur plusieurs indices de comparaison annuels, notamment :

- la demande annuelle de chauffage [kWh]
- la demande annuelle rapportée à la surface du bâtiment [kWh.m⁻²]
- la puissance maximale de chauffage [kW].

Ces grandeurs sont réunies dans le Tableau 5.6, en fonction de l'implantation géographique.

	Trappes	Chambéry	Marseille
Besoins annuels	2 872 kWh	2 728 kWh	332 kWh
Besoins annuels rapportés à la surface	29.5 kWh.m ⁻²	28.0 kWh.m ⁻²	3.4 kWh.m ⁻²
Puissance maximale de chauffage	5.5 kW	5.6 kW	1.5 kW

Tableau 5.6 : Indices de comparaison annuels des besoins de chauffage

Au regard des exigences de la RT 2005, les besoins annuels en chauffage sont certes faibles, mais pas utopiques. Le choix du bâtiment est capital pour évaluer l'intérêt du stockage thermique. Si l'installation d'un système énergétique performant dans une maison mal isolée a peu sens, l'intérêt est tout aussi limité dans le cas d'un bâtiment aux besoins en chauffage quasi-inexistants, ce qui semble être le cas de la maison INCAS installée à Marseille.

Compte tenu du champ d'application du système développé au cours de cette thèse, les travaux se sont concentrés sur les besoins en chaleur pour le chauffage, à l'exclusion de tout autre poste de consommation, tout en gardant en ligne de mire le marché de la maison individuelle à basse consommation. Pour satisfaire le critère du label BBC, la consommation en énergie primaire ne doit pas excéder 65 kWh.m⁻².an⁻¹ à Trappes et à Chambéry (pour une altitude comprise entre 400 et 800m) et 40 kWh.m⁻².an⁻¹ à Marseille. A première vue, les besoins annuels en chaleur pour le chauffage de la maison INCAS semblent assez cohérents avec cette limite maximale.

5.3. Gestion du stockage thermique au cours de la décharge

Au vu du potentiel solaire en France, sur une grande partie du territoire, la recharge du système de stockage hors période estivale paraît peu envisageable. Si une maison individuelle est munie de capteurs solaires thermiques à air, l'utilisation directe de l'air chaud pour le chauffage en complément d'un système de chauffage existant se révèle plus avantageuse. Pour cette raison, le caractère inter-saisonnier du stockage de chaleur a été conservé, avec une unique phase de charge continue effectuée durant l'été.

Concernant la décharge du système, diverses stratégies sont pertinentes selon le but visé. Deux types de gestion de la décharge du stockage ont ainsi été considérés : un mode de *stockage inter-saisonnier strict*, mettant en jeu une décharge unique et continue sur toute la saison de chauffage, et un mode de *stockage saisonnier à décharges multiples*, impliquant plusieurs décharges de chaleur en période de pointe, correspondant aux pics de consommation d'électricité. Ce second mode de gestion présente de surcroît de sérieux atouts, tant pour l'utilisateur que pour le gestionnaire de réseau.

5.3.1. Les périodes de pointe

5.3.1.1. Les enjeux

L'impact du secteur du bâtiment, responsable d'environ 43% de la consommation de chaleur en France, est décisif dans la gestion des pics de consommation à l'échelle du réseau. Dans le contexte français de chauffage à forte proportion électrique, le déstockage de chaleur en période de pointe présente un intérêt certain pour le gestionnaire de réseau, car il contribue au lissage des courbes de charge. De plus, par l'utilisation du stockage en période de pointe, le recours à certaines centrales à démarrage rapide, plus précisément les centrales à combustibles fossiles, peut être évité. En participant ainsi à la diminution des émissions de gaz à effet de serre, les décharges de chaleur concentrées sur les périodes de pointe susciteraient un véritable bénéfice sur le plan environnemental.

Restreindre l'utilisation du stockage thermique aux périodes de pointe suppose l'existence préalable d'un système de chauffage, ce qui rend le système particulièrement adapté au marché de la rénovation. En particulier, l'installation d'un système de stockage thermochimique utilisant l'air comme fluide caloporteur en synergie avec une pompe à chaleur air/air apparaît judicieux. Les pompes à chaleur présentent en effet un inconvénient majeur : leurs performances dépendent fortement de la température de la source. En période de grand froid, leur rendement chute et leur consommation d'électricité peut s'en ressentir. L'utilisation d'un stockage thermique en complément d'une pompe à chaleur à air permettrait de réduire la demande d'électricité et de la différer aux heures creuses. Les avantages sont alors partagés : pour l'usager, la facture d'électricité réduite ; pour EDF, le

stockage permet de diminuer voire d'effacer les pics de demande d'électricité, notamment associés aux pics de froid.

Dans la consommation énergétique des maisons individuelles, deux périodes de pics de consommation sont aisément identifiables : l'hyper-pointe correspondant à la fin de la journée, entre 18h et 20h (Figure 5.7), et les jours les plus froids de l'année (Figure 5.8).

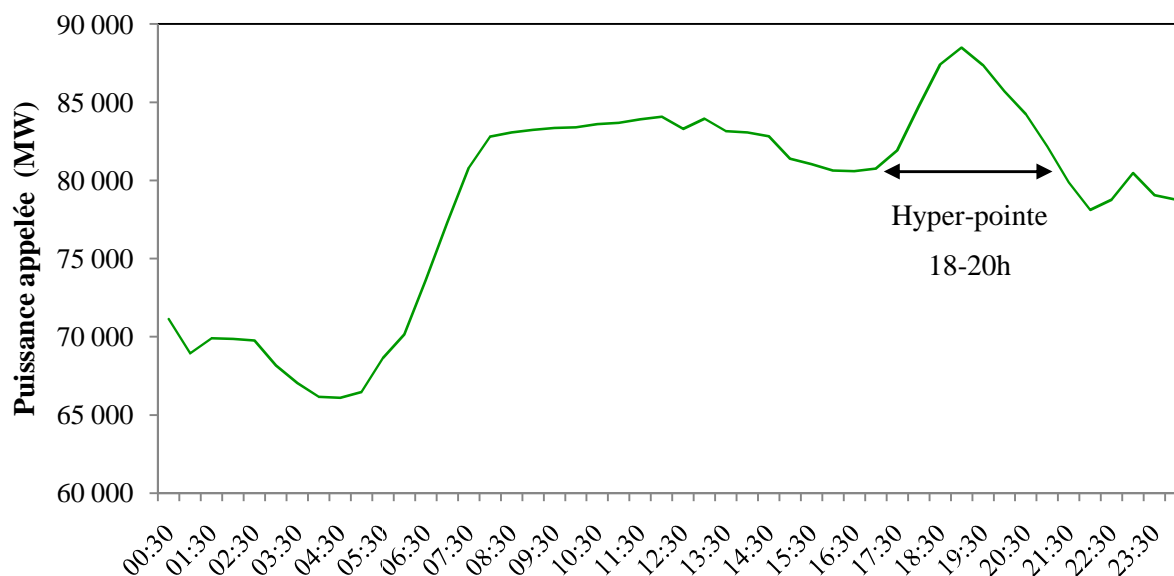


Figure 5.7 : Consommation d'électricité en France – Journée du 20 janvier 2010 (RTE, 2010)

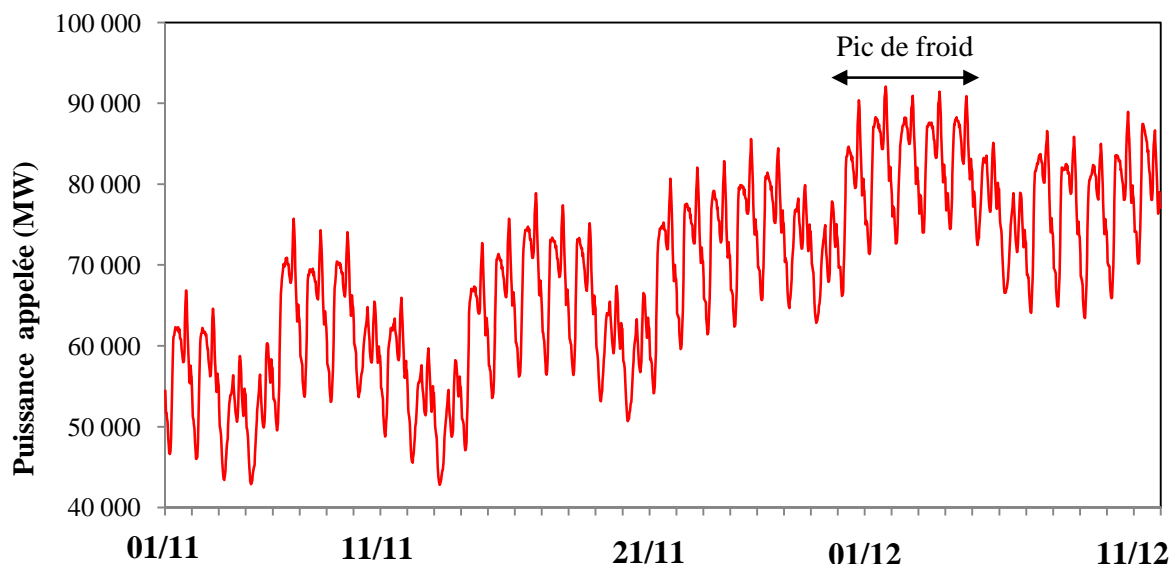


Figure 5.8 : Consommation d'électricité en France – Période du 1^{er} novembre au 11 décembre 2010 (RTE, 2010)

Etant donnée la constante de temps du système de stockage thermochimique, de l'ordre de plusieurs heures, les hyper-pointes de 18-20h paraissent difficilement

accessibles. C'est pourquoi l'étude s'est focalisée sur le déstockage de chaleur en période de pic de froid.

5.3.1.2. Les jours EJP

La tarification EJP, pour Effacement des Jours de Pointe, vise à décourager la consommation d'électricité les jours où le réseau est le plus sollicité, notamment en période de grand froid. Il permet de bénéficier pendant 343 jours par an d'un tarif proche de celui des Heures Creuses du tarif Heures Pleines / Heures Creuses (Tableau 5.7). En contrepartie, le prix du kWh est plus élevé pendant 22 jours par an, répartis entre le 1er novembre et le 31 mars. La durée d'effacement est de 18 heures, de 7h à 1h du matin (EDF, 2010).

Tarif	Prix HT (€/kWh ¹)	Prix TTC (€/kWh ¹)
Normal	0.0641	0.0894
EJP	0.4107	0.5437

Tableau 5.7 : Tarif EJP au 15 août 2010

Les jours EJP sont gérés par EDF à partir des prévisions de consommation du parc électrique, dans le but d'optimiser au mieux l'équilibre production/ consommation. Le plus souvent, ils correspondent aux jours de forte demande, comme lors d'une vague de froid sur le territoire, mais ils peuvent également être placés en cas d'indisponibilité de centrales de production ou de lignes de transport d'électricité à haute tension. Depuis le 1^{er} décembre 2006 la France est divisée en 4 zones EJP : OUEST, PACA, France NORD et France SUD. Chaque zone est susceptible de placer un jour EJP indépendamment du calendrier des autres zones. Le placement d'un jour EJP dépendra de la situation particulière de l'équilibre production/consommation à l'intérieur de chaque zone.

Bien que la tarification EJP ne soit plus disponible à la souscription depuis fin 1998, ces 22 jours EJP sont un bon indicatif des périodes critiques de l'hiver, où une très forte demande d'électricité pourra générer des tensions sur le réseau.

5.3.1.3. Repérage des périodes de pointe dans l'année

L'identification des 22 jours EJP a été effectuée en suivant les températures journalières moyennes à Trappes, Chambéry et Marseille. Pour ce faire, les fichiers de données climatiques du logiciel TRNSYS ont été analysés et les 22 jours EJP ont été désignés comme étant les 22 jours les plus froids de l'année. La seconde période étudiée correspond aux 40 jours les plus froids de l'année.

Afin de réellement repérer les 40 jours les plus froids de l'année, la saison de chauffage a été élargie du 1^{er} octobre au 30 avril. Ceci se justifie particulièrement dans le cas de la zone H1, où les mi-saisons peuvent s'avérer assez fraîches. Le recensement exact des 22 et des 40 jours les plus froids est détaillé en annexe B. A titre d'exemple, la Figure 5.9 illustre le pointage des jours les plus froids du mois de janvier.

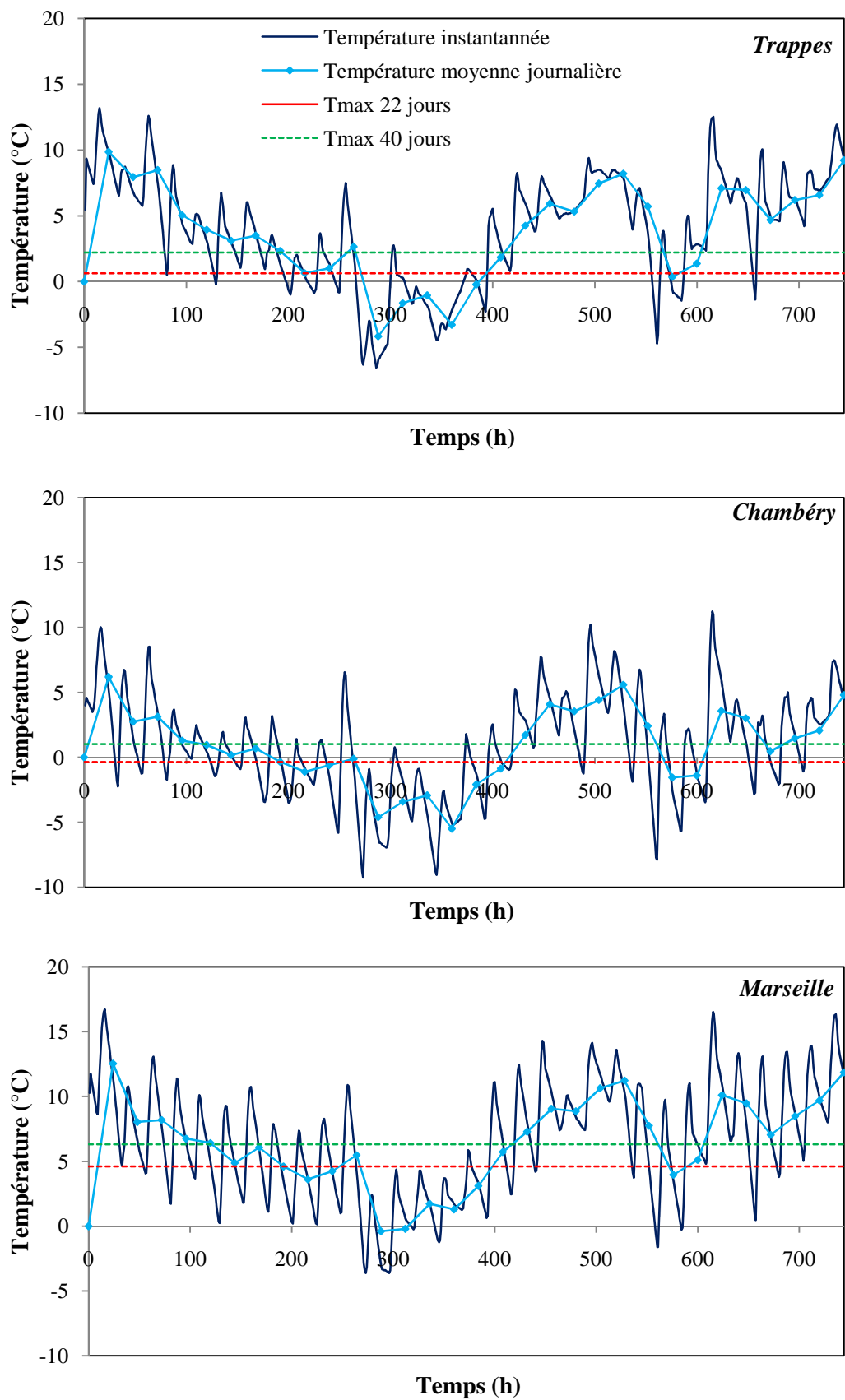


Figure 5.9 : Repérage des jours EJP – Exemple du mois de janvier à Trappes, Chambéry et Marseille

Les limites maximales de la température moyenne journalière correspondant à ces deux périodes sont rassemblées dans le Tableau 5.8. En deçà de ces seuils, les jours sont donc classés dans les 22 ou 40 jours les plus froids.

	Trappes	Chambéry	Marseille
Seuil de température moyenne journalière 22 jours EJP	0.64°C	-0.35°C	4.60°C
Seuil de température moyenne journalière 40 jours les plus froids	2.21°C	1.02°C	6.32°C

Tableau 5.8 : Températures limites correspondant aux 22 jours EJP et aux 40 jours les plus froids

5.3.2. Scénarios de décharge retenus

5.3.2.1. Stockage inter-saisonnier strict

Ce premier mode de décharge de chaleur, que l'on qualifiera d'*inter-saisonnier strict*, repose sur une stratégie à l'échelle annuelle (Figure 5.10). La période estivale est entièrement dédiée à la recharge du système. La phase de décharge est effectuée en une fois, en continu, sur toute la saison de chauffage. Le stockage de chaleur est alors dimensionné pour couvrir la totalité de la demande en chaleur pour le chauffage du bâtiment (cf. Tableau 5.6). Ce type de gestion vise une fraction solaire de 100%.

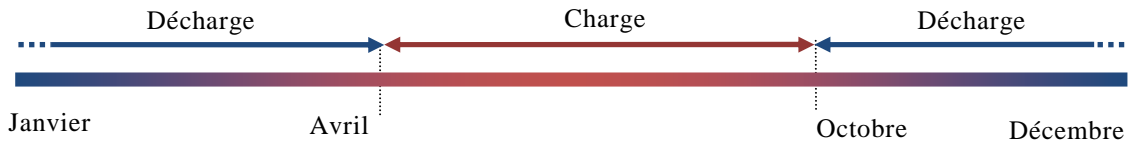


Figure 5.10 : Vision schématique du mode de stockage inter-saisonnier strict

5.3.2.2. Stockage inter-saisonnier avec décharges en période de pointe

En adoptant cette stratégie, le stockage inter-saisonnier est conçu pour l'effacement de pointes. Le stockage thermochimique est toujours régénéré durant l'été, mais il est déchargé uniquement en période de pic de demande en électricité (Figure 5.11). Ces périodes coïncident généralement avec les vagues de froid. Ce mode de fonctionnement sera désigné sous l'appellation *mode de stockage à décharges multiples*.

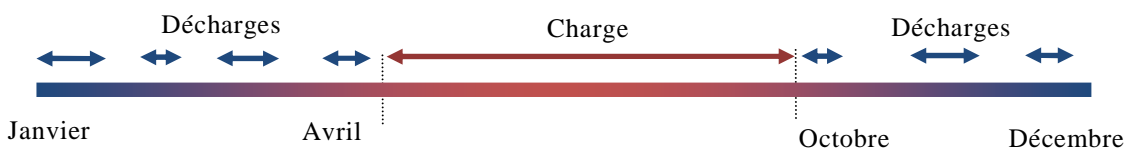


Figure 5.11 : Vision schématique du mode de stockage à décharges multiples

Le recours à de multiples décharges dans l'année en période de pointe présente plusieurs atouts de taille. Outre la diminution de la facture énergétique pour l'utilisateur, il permet la réduction des volumes de stockage par rapport au cas d'une décharge continue durant tout l'hiver. Dans le cadre de notre étude, le stockage sera dimensionné pour les 22 et les 40 jours les plus froids.

5.3.3. Demande en chaleur en période de pointe

En comparant les besoins annuels en chaleur associés aux 22 et aux 40 jours les plus froids à la demande énergétique du reste de l'année, l'enjeu de la couverture de ces périodes est clairement mis en évidence (Figure 5.12).

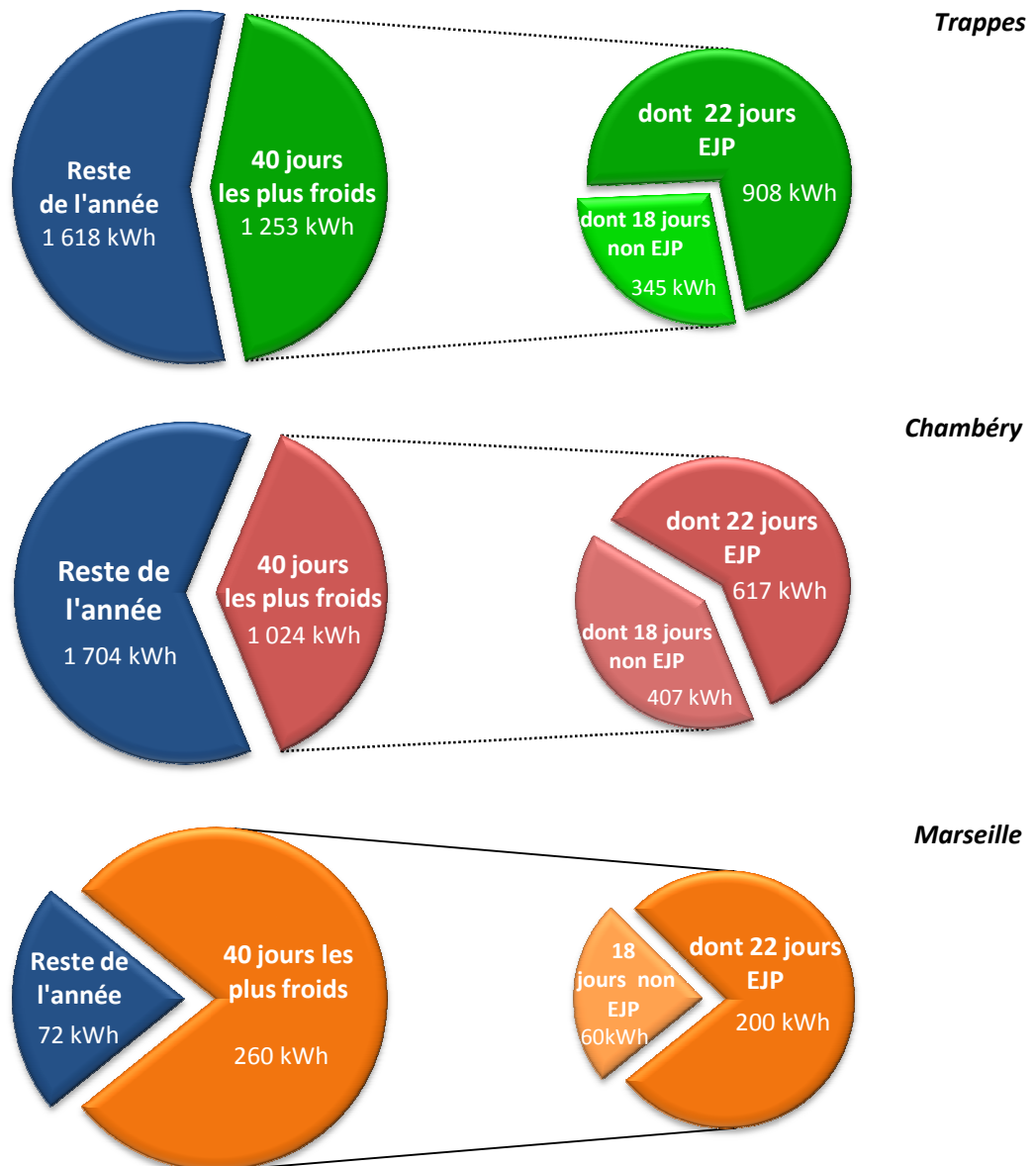


Figure 5.12 : Part de la demande des 20 et 40 jours les plus froids dans la demande annuelle en chaleur

Dans le cas particulier des régions méditerranéennes, où les besoins en chaleur de la maison INCAS sont assez limités, la saison de chauffage est relativement courte, c'est pourquoi les 40 jours les plus froids de l'année comptent pour la quasi-totalité des besoins annuels, en l'occurrence 78%. Dans des régions où la saison de chauffage est longue, ce qui est le cas en zone H1, les 40 jours les plus froids de l'année représentent tout de même une part substantielle de la demande annuelle en chaleur : cette fraction s'élève à 44% des besoins annuels à Trappes et 38% des besoins annuels à Chambéry.

5.4. Dimensionnement du système de stockage

5.4.1. Estimation de la quantité d'eau disponible

5.4.1.1. Hypothèses de calcul

L'évaluation de la quantité d'eau disponible est une question fondamentale, car la vapeur d'eau est un réactif pour le phénomène de sorption sur le composite zéolithe-MgSO₄. Le système envisagé repose sur l'utilisation de l'humidité de l'air issu de l'habitat pour alimenter le phénomène de sorption. Afin d'étudier la faisabilité d'un tel système, deux grandeurs sont à considérer : d'une part, la masse d'eau nécessaire à l'accomplissement de la réaction, d'autre part la masse d'eau récupérable par condensation.

Sur une période donnée, la masse d'eau nécessaire est déterminée à partir de la demande en chaleur du bâtiment, exprimée en kJ, et de la chaleur de sorption ($\Delta H = 4532 \text{ kJ.kg}^{-1}$ d'eau sorbée) :

$$m_{\text{eau nécessaire}} = \frac{E_{\text{demande chauffage}}}{\Delta H} \quad (5.1)$$

La masse d'eau récupérable par condensation est déduite des données d'humidité spécifique ω de l'air régnant dans chaque zone du bâtiment et du volume horaire d'air échangé V_h ; pour la maison INCAS, cette grandeur s'élève à $146.25 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. En première approximation, le calcul suppose le cas idéal où l'intégralité de l'eau contenue dans l'air est récupérable.

$$m_{\text{eau récupérable}} = \omega \rho_{\text{air sec}} V_h \quad (5.2)$$

5.4.1.2. Estimation des quantités d'eau nécessaire et récupérable

Pour le mode de stockage inter-saisonnier strict, une approche globale a été adoptée en raisonnant sur toute la saison de chauffage, qui s'étend du 1^{er} octobre au 30 avril en zone H1 (Trappes et Chambéry), et du 1^{er} novembre au 31 mars en zone H3 (Marseille). Le même raisonnement a été suivi pour estimer les quantités d'eau nécessaire et récupérable au cours des périodes de pointes des 40 et 22 jours les plus froids de l'année. Au regard des besoins en eau pour alimenter le réacteur en phase de décharge, la quantité d'eau récupérable dans l'habitat paraît tout à fait satisfaisante (Tableau 5.9).

Mode de stockage	Période de décharge	Quantité d'eau	Trappes	Chambéry	Marseille
Stockage inter-saisonnier strict	Toute la saison de chauffage	Masse d'eau nécessaire	1 645 kg	1 818 kg	261 kg
		Masse d'eau récupérable	9 725 kg	9 788 kg	6 833 kg
Stockage saisonnier à décharges multiples	40 jours les plus froids	Masse d'eau nécessaire	753 kg	813 kg	206 kg
		Masse d'eau récupérable	1 737 kg	1 679 kg	1 562 kg
	22 jours EJP	Masse d'eau nécessaire	460 kg	490 kg	158 kg
		Masse d'eau récupérable	921 kg	907 kg	890 kg

Tableau 5.9 : Quantités d'eau nécessaire et récupérable

Toutefois, ces travaux préliminaires de dimensionnement à l'échelle annuelle ne peuvent traduire le comportement dynamique du stockage. La puissance libérée au cours de la décharge est étroitement liée au niveau d'humidité de l'air d'alimentation du système. Le niveau d'humidité dans l'air est lui-même très dépendant du climat, mais également des activités des occupants et de la nature de l'enveloppe du bâtiment. A ce stade, seule la modélisation rigoureuse du comportement thermo-hygro-aérodynamique du bâtiment et/ou le retour d'expériences sur le terrain peuvent fournir des informations sur l'évolution instantanée des quantités d'eau disponible dans l'air extrait de l'habitat. La question des interactions entre les occupants et l'enveloppe est complexe. Cet aspect, non traité dans cette thèse, révélera sans doute la nécessité d'un appoint ponctuel d'eau si le système requiert plus de puissance.

5.4.2. Dimensionnement du réacteur de stockage

5.4.2.1. Conception modulaire du réacteur

Elément central du système de stockage thermique, le réacteur thermochimique est le siège des réactions de charge (désorption de vapeur d'eau) et de décharge (sorption de vapeur d'eau) de chaleur. Sa géométrie et sa configuration sont des éléments décisifs, car ils conditionnent les performances du système global. La nature des échanges, impliquant un gaz et un solide en milieu poreux, rend la conception du réacteur particulièrement complexe : il s'agit de privilégier les transferts de matière, tout en maximisant la récupération de chaleur par l'air.

Afin d'optimiser son utilisation tout au long de la période hivernale, la conception du réacteur est modulaire (Figure 5.13).

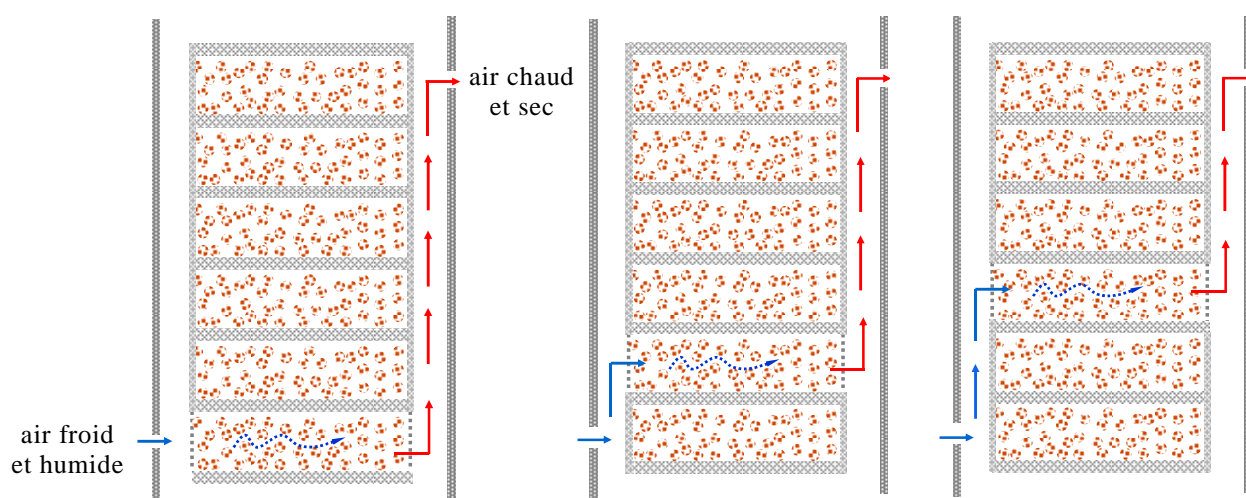


Figure 5.13 : Principe du réacteur de stockage modulaire – Phase de décharge

Dans le mode de fonctionnement le plus simple, les modules sont déchargés un à un. Le matériau de stockage est alimenté en air humide via une entrée latérale située au fond du réservoir. La fraction de vapeur d'eau contenue dans l'air humide diminue à mesure que l'air traverse le réacteur. Fluide support du réactif, l'air humide est également le fluide caloporteur : en captant la chaleur dégagée par le phénomène de sorption ayant lieu sur le composite, l'air initialement frais et humide sort du système plus chaud et plus sec.

Une isolation thermique est mise en place entre chaque module. En cas de pic de consommation, la décharge de plusieurs modules en parallèle peut être envisagée afin d'obtenir plus de puissance ; ce mode de décharge pourra être commandé par une régulation adéquate. Chaque unité est dimensionnée pour couvrir les besoins en chaleur d'une période déterminée, pouvant s'étendre sur plusieurs jours voire plusieurs semaines.

5.4.2.2. Eléments de dimensionnement

Il s'agit ici d'estimer le volume du réservoir/réacteur thermochimique de stockage de chaleur. Les grandeurs issues des simulations TRNSYS à l'échelle du bâtiment, en particulier les besoins en chaleur et la puissance maximale demandée, sont ainsi confrontées aux performances expérimentales d'un module élémentaire de matériau composite zéolithe – sulfate de magnésium. Cette unité, représentant l'élément de base de construction du réacteur, a été caractérisée en termes d'énergie et de puissance libérées au cours d'essais de sorption (cf. chapitre 4, partie 4.3. *Expérimentation à grande échelle*). Les principaux résultats de l'expérimentation en phase de décharge de chaleur sont rappelés dans le Tableau 5.10. A partir de ces éléments, le dimensionnement du stockage est réalisé en déterminant le nombre de modules requis pour la couverture des besoins correspondant à la saison complète, aux 22 jours EJP et aux 40 jours les plus froids de l'année.

Dimensions du module	Volume du module	7.1 L
	Masse de matériau	4.8 kg
Performances en décharge	Puissance maximale disponible *	63 W
	Energie totale récupérée *	636 Wh soit 133 Wh.kg ⁻¹ ou 90 kWh.m ⁻³

* Résultats obtenus sous alimentation en air humide à 20°C, 50% d'humidité relative et un débit de 20 m³.h⁻¹.

Tableau 5.10 : Rappel des caractéristiques expérimentale du module de ZM15 (résultats du chapitre 4)

5.4.2.3. Dimensionnement du réacteur modulaire

Le stockage de chaleur est dimensionné pour couvrir l'ensemble des besoins énergétiques relatifs au mode de gestion envisagé : l'intégralité de la saison de chauffage pour le mode stockage inter-saisonnier strict, ou les périodes de pointes hivernales pour le mode de stockage saisonnier à décharges multiples. De cette demande en chaleur est déduit le nombre de modules de matériau ZM15 nécessaire, et par conséquent, le volume de stockage (Tableau 5.11).

	Trappes	Chambéry	Marseille
Toute la saison de chauffage	31.6 m ³	30.0 m ³	3.7 m ³
40 jours les plus froids	13.8 m ³	11.3 m ³	2.9 m ³
22 jours EJP	10.0 m ³	6.8 m ³	2.2 m ³

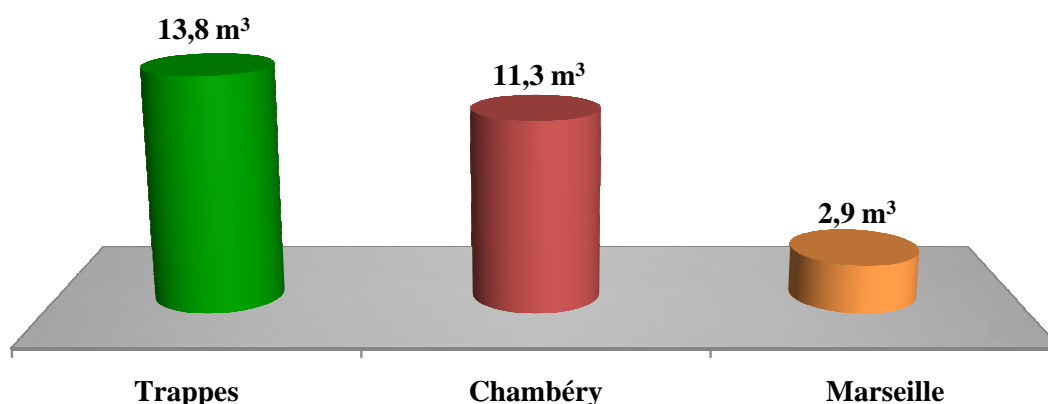
Dimensionnement réalisé à partir des performances expérimentales d'un module de 5 kg (7 L) de ZM15.

Tableau 5.11 : Volumes de stockage évalués sur la base des données expérimentales

Pour un stockage strictement inter-saisonnier, les volumes de stockage estimés en zone H1, de l'ordre de 30 m³, paraissent absolument réhibitifs. A titre de comparaison, le volume d'une cuve de fioul est de l'ordre de 1 à 3 m³. En revanche, la mise en place de ce mode de stockage est tout à fait envisageable en zone H3, car le stockage est assez compact pour rendre le système attractif.

Selon la région considérée, la limitation de la couverture des besoins aux périodes de pointes hivernales s'avère plus ou moins avantageuse. A Marseille, où les 40 jours les plus froids représentent la quasi-totalité de la saison de chauffage, la diminution du volume de stockage associée n'est que de 22%. Par conséquent, si l'investissement dans un tel système énergétique est envisagé, le choix d'un stockage capable de couvrir toute la période hivernale est entièrement justifié. A l'inverse, le gain de place est substantiel en zone H1 : la couverture des 40 jours les plus froids de l'année au lieu de la saison complète occasionne une diminution du volume de stockage de l'ordre de 60% à Trappes et à Chambéry, d'où des volumes

de stockage plus raisonnables (Figure 5.14). Devant l'enjeu que représentent les pics de froids, il paraît judicieux dans ces régions de concentrer l'effort sur ces 40 jours les plus froids.



Sous l'hypothèse d'un système à 7 modules de 7 L disposés en parallèle, alimenté par un débit d'air global de $140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à 25°C , 50% d'humidité relative

Figure 5.14 : Volumes de stockage correspondants aux 40 jours les plus froids

En considérant le composite ZM15 comme un mélange de deux phases sans interactions, l'énergie théoriquement libérée par la sorption et réaction chimique peut atteindre $344 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ (cf. chapitre 3, *Tableau 3.5 : Densités énergétiques théoriques des matériaux bruts et du composite ZM15*). La confrontation des volumes de stockage idéaux déterminés à partir de cette limite théorique (Tableau 5.12) aux résultats du dimensionnement basés sur les données expérimentales montre qu'une infime partie du potentiel de ZM15 est exploitée. L'expérimentation avait en effet révélé la difficulté de récupérer lors de la décharge l'intégralité de l'énergie stockée en charge. A l'avenir, l'optimisation du design du réacteur permettra d'affiner le dimensionnement et d'augmenter la compacité du système.

	Trappes	Chambéry	Marseille
Toute la saison de chauffage	8.3 m^3	7.9 m^3	1.0 m^3
40 jours les plus froids	3.6 m^3	3.0 m^3	0.8 m^3
22 jours EJP	2.6 m^3	1.8 m^3	0.6 m^3

Tableau 5.12 : Volumes de stockage théoriques

Pour satisfaire les besoins en chaleur, les modules constituant le réacteur doivent être agencés en série, du point de vue de l'écoulement d'air humide. Pour répondre à la demande en puissance, l'assemblage de plusieurs modules en parallèle peut être envisagé. D'après l'expérimentation réalisée à $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, la puissance délivrée par le module unitaire de 7 L de ZM15 s'élève à 63 W. Le choix d'un débit global

d'alimentation en air de l'ordre de grandeur du volume horaire échangé de la maison INCAS ($146.25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) impose un nombre de 7 modules en parallèle. Sous l'hypothèse d'un débit de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ par module, le réacteur reçoit donc $140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et la puissance libérée peut atteindre un maximum de 441 W. Devant les 5.5, 5.6 et 1.5 kW demandés respectivement à Trappes, Chambéry et Marseille, le niveau de puissance fourni en décharge par un système à 7 modules en parallèle est clairement insuffisant. En l'état actuel des connaissances, des incertitudes persistent quant aux capacités du système en fonction des paramètres d'entrée, notamment le débit, la température et l'hygrométrie de l'air en entrée. En considérant ces mesures, il faudrait donc assembler près de 90 modules en parallèle pour obtenir la puissance requise en zone H1, ce qui est difficilement concevable. En outre, le système de stockage serait considérablement surdimensionné, vis-à-vis des besoins en énergie du bâtiment.

Afin de relever le niveau de puissance, plusieurs voies d'amélioration sont à explorer. D'un point de vue expérimental, une valeur optimale du débit, correspondant à la puissance maximale disponible par module, et au-delà de laquelle aucun bénéfice en puissance n'advient, devra être déterminée. L'identification de cette valeur limite conduira à un redimensionnement du système, avec un nouveau nombre de modules à disposer en parallèle. Si le niveau de puissance reste insuffisant, il conviendra d'agir sur le second principal levier de la puissance dégagée par la sorption : l'hygrométrie de l'air en entrée. La mise en place d'une source d'eau d'appoint, déclenchée uniquement en cas de fort appel de puissance, pourra être envisagée. Ainsi, les volumes de stockages attendus sont grandement inférieurs aux valeurs issues de ce pré-dimensionnement, et l'affinement des conclusions passera nécessairement par la réalisation de séries de tests à différents débits et différentes hygrométries, mais surtout par la validation d'un modèle en conséquence. Ce modèle permettra de prévoir la puissance et l'énergie dégagées en fonction de tous les paramètres impactant sur la puissance.

5.5. Conclusion

L'objet de ce chapitre est de dimensionner un système de stockage thermo-chimique à base de ZM15, adapté aux besoins énergétiques d'un Bâtiment Basse Consommation. Ce travail a été réalisé à l'aide de simulations annuelles effectuées sous TRNSYS.

Dans le concept développé au cours de cette thèse, le stockage thermique est couplé au bâtiment via le système de ventilation. Celui-ci assure donc l'alimentation en air humide durant la phase de décharge de chaleur et l'habitat devient source d'humidité. Une approche globale a été adoptée pour l'estimation de la quantité d'eau disponible dans l'air extrait du bâtiment. Ces travaux préliminaires, basés sur les seules données TRNSYS d'humidité du bâtiment, montrent que l'ajout d'un système d'appoint d'eau est a priori inutile. Une analyse plus précise de la quantité d'eau instantanée disponible en période de déstockage nécessiterait une modélisation rigoureuse du comportement thermo-hygro-aéroulque du bâtiment.

La gestion du système en décharge a été abordée selon deux stratégies, tout en conservant le caractère inter-saisonnier du stockage, avec unique phase de charge estivale. Le *stockage inter-saisonnier strict*, impliquant une phase continue de décharge sur toute la saison de chauffage, s'inclut dans la conception d'un système de chauffage 100% solaire, tandis que le *stockage saisonnier à décharges multiples*, mettant en jeu plusieurs décharges en période de pointes hivernales, exploite le stockage comme auxiliaire d'un système existant et permet de réduire la facture énergétique de l'utilisateur. Dans ce second mode, le stockage joue un rôle clé dans la gestion des pics de consommation d'électricité à l'échelle du réseau.

Après évaluation des besoins énergétiques pour le chauffage du bâtiment, la taille du stockage est estimée à partir des performances expérimentales d'un module unitaire de 7L de matériau ZM15. Les résultats du dimensionnement montrent que le stockage strictement inter-saisonnier est difficilement réalisable en dehors de la zone H3. Si à Marseille le volume de stockage estimé est acceptable (3.7 m^3), à Trappes comme à Chambéry, la taille du stockage, de l'ordre de 30 m^3 , est totalement rédhibitoire. Dans ces régions, la pertinence du stockage se situe principalement au niveau des 40 jours les plus froids, avec des volumes de 11 à 14 m^3 en zone H1. La marge de progression concernant la compacité du système est encore considérable, dans la mesure où les conditions expérimentales à la base du dimensionnement ne sont pas optimales. En effet, la densité de stockage théorique du composite ZM15 prévoit des volumes de stockage de l'ordre de 8 m^3 en zone H1 pour la totalité de la saison de chauffage.

A l'issue de ces travaux, des incertitudes demeurent quant au niveau de puissance atteint par le système au cours de la décharge. A ce sujet, le design du réacteur joue un rôle prépondérant. L'approfondissement de l'étude passera notamment par une expérimentation plus aboutie et surtout l'optimisation du design du réacteur. A cette fin, la modélisation des transferts de chaleur et de matière mis en jeu dans un lit de matériau ZM15 a été entreprise dans le chapitre suivant.