

Etude d'un système de stockage d'énergie solaire thermique répondant aux besoins en chauffage d'une habitation unifamiliale

Auteur : Gatellier, Baptiste

Promoteur(s) : Hauglustaine, Jean-Marie

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/6293>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Faculté des Sciences Appliquées

*Etude d'un système de stockage
d'énergie solaire thermique
répondant aux besoins en
chauffage d'une habitation
unifamiliale*

Mémoire de fin d'étude réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master Ingénieur Civil Architecte par Baptiste Gatellier

Année Académique : 2018-2019

Promoteur : Jean-Marie Hauglustaine

Composition du jury : Stéphane Monfils, Philippe Andre, Vincent
Lemort, Frédéric Nguyen et Alain Heeren

Avant toute chose, je voudrais remercier chaleureusement Jean-Marie Hauglustaine, mon promoteur, ainsi que Stéphane Monfils, pour l'intérêt qu'ils ont apporté à mon travail, pour m'avoir suivi tout au long de l'année et pour m'avoir guidé dans ma réflexion et mes recherches.

Je voudrais également remercier tout particulièrement Philippe Andre pour son soutien permanent, son aide précieuse, tout le temps qu'il m'a consacré et son intérêt vis-à-vis de mon travail.

Je souhaite également remercier les membres de mon Jury, monsieur Lemort, monsieur Nguyen et monsieur Heeren pour leur attention et leur expertise.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'expérience et la gentillesse de Rudolph Wallenberger, qui m'a accueilli à nombreuses reprises.

Pour son soutien de tous les jours et la relecture je souhaite remercier Judith Fournier.

Enfin, un immense merci à mes trois colocataires : Serge pour ton soutien constant, Tony, mon modèle jusqu'à la fin et Bill pour ta foi en moi.

Résumé

La prise de conscience en trois temps du réchauffement climatique (de la communauté scientifique dans un premier temps puis de l'opinion public et dernièrement de la classe politique) a placé les énergies renouvelables sur le devant de la scène. Cet intérêt grandissant, que certains qualifieraient de tardif, touche tous les domaines. L'un des plus concernés est le domaine du bâtiment qui canalise 12% des recherches. Cependant, il semblerait qu'il y ait encore des hétérogénéités dans le monde et même en Europe vis-à-vis de l'application des énergies renouvelables au secteur du bâtiment. Rudolph Wallenberger, autrichien venu s'installer dans le sud de la France à la fin des années 1970, a souligné une incohérence lors de notre rencontre : pourquoi en Autriche, pays disposant de ressources solaires moins importantes qu'en France, les systèmes de stockage d'énergie solaire se multiplient et non en France (notamment dans le sud). C'est à la suite de cette rencontre que nous avons décidé d'étudier un système de stockage d'énergie solaire constitué d'une cuve d'eau entourée d'un matériau à bonne inertie comme le sable, le tout isolé, enterré et alimenté par des panneaux solaires thermiques en vue de fournir de la chaleur pour le chauffage d'une habitation unifamiliale. Le but de ce travail est d'étudier les paramètres qui influent sur les performances d'un tel système, tout en mettant en relation ces performances et le coût de l'installation afin de ne pas oublier la réalité économique.

The three-stage awareness of global warming (first of all from the scientific community, then from public opinion and recently from politicians) has put renewable energies at the forefront. This growing interest, which some would describe as late, affects all areas. One of the most concerned is the building sector, which channels 12% of research. However, it would seem that there are still heterogeneity in the world and even in Europe with regard to the application of renewable energies to the construction sector. Rudolph Wallenberger, an Austrian who moved to southern France in the late 1970s, pointed out an inconsistency when we met: why in Austria, a country with fewer solar resources than France, solar energy storage systems are multiplying and not in France (especially in the south). It was following this meeting that we decided to study a solar energy storage system consisting of a water tank surrounded by a material with good inertia such as sand, all insulated and buried in the ground and powered by solar thermal panels to provide heat for heating a single-family home. The purpose of this work is to study the parameters that influence the performance of such a system, while relating this performance to the cost of installation so as not to forget the economic reality in which we live.

Table des matières

Introduction.....	7
I. État de l'art	12
I.1. Les solutions de stockage	12
I.1.1. Généralités	13
I.1.2. Le stockage sensible	21
II. Méthodologie	31
II.1. Définition du système.....	32
II.1.1. Choix du système de stockage.....	32
II.1.2. Choix de l'habitation.....	34
II.2. Définition des scénarios et évaluation des performances	41
II.2.1. Le matériau de stockage.....	41
II.2.2. Le matériau à inertie	41
II.2.3. Le matériau isolant	41
II.2.4. La géométrie du système	42
II.2.5. Évaluation des performances	42
III. Modélisation TRNSYS.....	44
III.1. Modélisation de l'habitation	44
III.1.1. Environnement général	44
III.1.2. Définition des couches	45
III.1.3. Définition des parois.....	47
III.1.4. Définition des fenêtres	48
III.1.5. Définition des gains internes	49

III.1.6. Définition du chauffage de l'habitation.....	51
III.1.7. Définition de la ventilation et de l'étanchéité à l'air	53
III.1.8. Définition de la zone habitation	53
III.2. Modélisation du système de stockage	56
III.2.1. Modélisation de la cuve.....	56
III.2.2. Modélisation de l'enveloppe	57
III.2.3. Relation cuve/zone	59
III.3. Modélisation du système général	61
III.3.1. Le système Météo-Habitation	62
III.3.2. La boucle de charge	63
III.3.3. La boucle de décharge.....	65
III.4. Extraction des données	67
IV. Résultats	68
IV.1. Cas de base.....	68
IV.1.1. Performances	68
IV.1.2. Coût	71
IV.2. Influence de la géométrie du système	73
IV.2.1. Performances	73
IV.2.2. Coût	77
IV.3. Influence de la stratification thermique.....	79
IV.4. Influence de la couche d'isolation.....	81
IV.4.1. Performances	81
IV.4.2. Coût	83
IV.5. Influence de la couche d'inertie	85
IV.5.1. Performances	85
IV.5.2. Coût	89

IV.6. Discussion	90
IV.6.1. L'étude sur le climat belge	90
IV.6.2. Etude rapide du climat du sud de la France	92
V. Conclusion	96
Bibliographie.....	97
Table des figures.....	100
Liste des tableaux	104

Introduction

Le XXème siècle voit l'émergence au sein de la sphère publique des préoccupations d'environnement global : le changement climatique ainsi que celle de développement durable. Cette prise de conscience marque ainsi le passage progressif de l'idée d'un développement qui s'impose comme une nécessité à un concept où les préoccupations d'environnement font face aux préoccupations économiques et sociales. Ce constat s'est établi selon trois étapes :

- un signal d'alarme venant de la communauté scientifique ;
- une prise de conscience populaire ;
- des actions politiques à l'échelle internationale.

En 1886, le prix Nobel de chimie suédois Svante August Archenius propose un calcul de l'effet de serre faisant le lien entre les températures terrestres et la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. Il faut toutefois attendre 1958, grâce au scientifique américain Charles Keeling, pour commencer à démontrer l'impact de l'activité humaine sur l'environnement.

Parallèlement à ces préoccupations de la part de la communauté scientifique, une part grandissante de la population commence à se soucier de l'impact du mode de vie des sociétés développées et industrielles sur notre écosystème. Ce mouvement populaire se manifeste dans les années 1960 avec notamment le mouvement hippie, le premier festival de Woodstock dont la publicité indiquait « venez respirer l'air pur » ainsi que la création des ONG Greenpeace et WWF (World Wide Found). Cette prise de conscience populaire comprend deux composantes :

- un besoin de changement du mode de fonctionnement des sociétés dont l'économie et le développement se basent sur les énergies fossiles ;
- la nécessité de préserver notre environnement.

Le débat sur la transition énergétique montre que les réponses aux questions d'environnement global n'apparaissent plus seulement comme indissociables des questions sociales et économiques, mais bien comme une source des évolutions sociétales à venir.

L'urgence de préserver notre environnement grâce aux énergies renouvelables est renforcée par les diverses catastrophes environnementales générées par les sources d'énergies traditionnelles.

En effet les nombreuses marées noires et la catastrophe de Tchernobyl font apparaître ces énergies non seulement comme désastreuses pour la planète étant donné leur utilisation, mais également lors de leur production ainsi que leur transport. En 2013, le rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), en reconnaissant une corrélation forte entre certains événements météorologiques et le renforcement des émissions de gaz à effet de serre, accélère la prise de conscience de la gravité de la situation qui s'affirme dans la société civile.

Cependant, après le constat des sociétés scientifique et civile, les réactions politiques internationales se font attendre. En 1992, lors du Sommet de la Terre de Rio au Brésil, il a été décidé d'adopter le « Convention-Cadre des Nations Unies sur le changement climatique » qui se rassemblera une fois par an à partir de 1995. Au sommet de la Terre succède le protocole de Kyoto en 1997 où 38 pays industriels s'engagent à réduire le total des émissions de gaz à effet de serre de 5% par rapport au niveau de 1990.

L'Europe apparaît alors comme fer de lance de la lutte contre le dérèglement climatique et approfondi les engagements de Kyoto en 2008 avec le Paquet Climat Énergie et les objectifs 3x20 pour 2020 :

- Une baisse de 20% des émissions de CO₂ par rapport à 1990 ;
- Une augmentation de 20% de l'efficacité énergétique ;
- 20% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique.

Le développement et la recherche des énergies renouvelables apparaissent alors comme une nécessité. Ces énergies peuvent prendre diverses formes et possèdent un très fort potentiel. Par exemple une étude du Département de l'Énergie a estimé que l'énergie des marées pouvait générer 44TWh/an, ce qui représente un potentiel annuel de 3,8Mtep, soit en ne considérant que les côtes du Royaume Uni. Autre source d'énergie quasi illimitée, le soleil nous fait parvenir chaque année 1.070.000 PWh (1PWh=10¹⁵Wh) soit 92Ttep (Futura Planete, 2018) ce qui représente 9.800 fois la consommation annuelle mondiale qui est d'environ 9,4Gtep. (IEA Energy statistics, 2015).

Cependant ces énergies renouvelables sont souvent intermittentes (soleil, vent, marées...). Nous avons donc besoin de les stocker.

Le stockage d'énergie peut s'opérer de diverses manières, la principale utilisée en France actuellement est le stockage sous forme d'énergie potentielle de pesanteur qui se fait en pompant de

l'eau au-dessus de barrages d'altitude puis en récupérant cette énergie grâce à des centrales hydrauliques.

En ce qui concerne l'énergie solaire, Li & Chan (Thermal Energy Storage Analyses and Designs, 2017) recensent trois stratégies d'utilisation et de stockage :

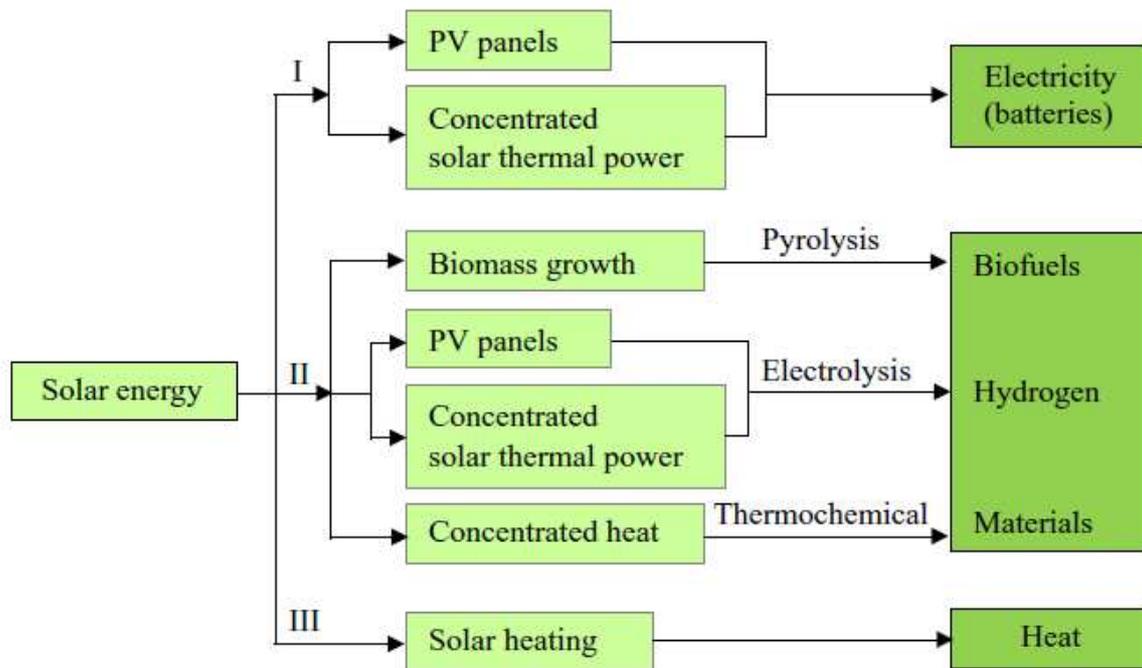


Figure 1 - Stratégies d'utilisation et de stockage (Li & Chan, 2017)

Pour la stratégie numéro I, le but est d'utiliser l'énergie solaire afin de produire de l'électricité grâce à des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires. Dans ce cas l'énergie est stockée dans des batteries.

La stratégie II vise à utiliser l'énergie solaire afin de transformer de la matière. Cette matière peut donc ensuite être stockée à long terme.

Enfin la stratégie III se base sur l'utilisation de la chaleur produite par le soleil. Cette chaleur peut ensuite être stockée sous forme sensible, latente ou thermochimique.

Toujours selon Li & Chan, la solution de stockage à court et moyen terme la moins contraignante et la plus aboutie à l'heure actuelle semble être le stockage thermique.

Nous pouvons d'ailleurs remarquer un intérêt grandissant de la communauté scientifique pour le stockage thermique (Yan & Yang, 2018).

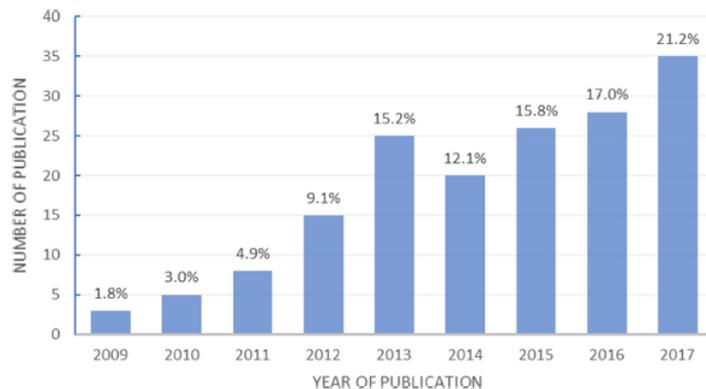


Figure 3 - Évolution du nombre de publication traitant de stockage thermique

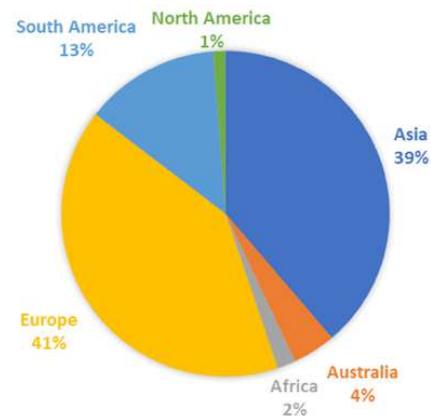


Figure 2 - Part des publications traitant du stockage thermique en fonction des continents

Et une fois de plus l'Europe, de concert avec l'Asie, apparaît comme leader de la recherche.

Parmi ces recherches sur le stockage d'énergie thermique, 12% traitent de son application au secteur du bâtiment. En effet le déphasage entre disponibilité de la ressource solaire et les besoins en énergie des bâtiments qui correspondent à peu près au déphasage jour/nuit semble annoncer le stockage d'énergie thermique comme une bonne solution pour le domaine du bâtiment et plus particulièrement pour le logement.

La solution la plus communément utilisée pour le stockage d'énergie thermique afin d'alimenter en eau chaude (de chauffage ou sanitaire) une habitation est l'utilisation d'une cuve d'eau isolée.

Un autre méthode plus « primaire » pourrait être qualifiée de stockage thermique appliqué au confort d'une habitation. Il s'agit d'utiliser l'inertie des murs de l'habitation afin de déphaser les apports solaires.

Après discussion avec Monsieur WalleMBERGER, ancien ingénieur et pilote de ligne autrichien venu s'installer dans le sud de la France à la fin des années 70, il semblerait que l'application du principe d'inertie thermique à une cuve d'eau chaude isolée soit également envisageable. Ce système particulier semble être communément employé pour stocker de l'énergie en Autriche.

Le principe serait de placer, entre la cuve d'eau et son isolation, un matériau à forte inertie thermique qui se chargerait lorsque la cuve est chaude et qui restituerait de l'énergie à la cuve, les jours de mauvais temps.

Cependant un tel système ne semble pas avoir été beaucoup étudié dans la littérature. Le but de notre travail sera donc d'étudier les performances d'un tel système et de voir les paramètres qui influent ces performances. Le présent travail se déroulera donc en quatre parties :

- Nous réaliserons tout d'abord un état de l'art. Cet état de l'art nous permettra tout d'abord de recenser et d'expliquer les différentes stratégies de stockage d'énergie thermique et plus particulièrement les stratégies applicables, tant d'un point de vue technique qu'économique, à une habitation unifamiliale. Dans une deuxième partie, nous étudierons l'habitat moyen en Wallonie d'un point de vue énergétique afin de pouvoir définir les applications possibles de notre système de stockage.
- Nous définirons ensuite notre méthodologie.
- Puis nous présenterons la modélisation de notre système grâce au logiciel TRNSYS.
- Enfin, nous exposerons les résultats de notre simulation.

I. État de l'art

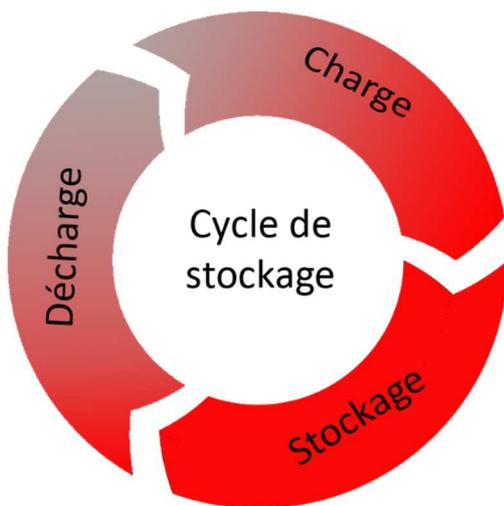
I.1. Les solutions de stockage

Dans cette première partie d'état de l'art, nous allons tenter de faire un état des lieux des différents moyens de stockage de l'énergie solaire thermique. Le but est ici de recenser les domaines d'application et les avantages et inconvénients de chaque méthode. Un système utilisant l'énergie thermique solaire se base sur deux composants principaux, selon Tian et Zhao (*A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, 2012*) : le collecteur et le système de stockage. Le collecteur doit avoir une bonne performance optique afin d'absorber le maximum d'énergie possible (Winter, 1991). Dans ce travail de fin d'étude, nous ne focaliserons pas notre attention sur les collecteurs ; nous choisirons donc un collecteur « standard » pour notre étude et nous nous concentrerons sur le système de stockage.

1.1.1. Généralités

L'intérêt d'un système de stockage est de compenser le déphasage entre la production d'énergie venant de la source et la demande en énergie (Cabeza, Martorell, Miro, Fernandez, & Barreneche, 2015). Dans notre cas, la source d'énergie est le soleil dont nous pouvons recevoir l'énergie thermique le jour et plus particulièrement les jours de beau temps. À contrario, la demande en chauffage d'une habitation est en général plus haute la nuit et les jours de mauvais temps. En effet, nous pourrions considérer l'enveloppe de notre bâtiment comme un collecteur plus ou moins efficace selon son isolation, son inertie, ses surfaces vitrées... Les jours de beau temps, le bâtiment profite donc des apports solaires qui contribuent donc à réduire ses besoins résiduels.

Le stockage d'énergie fonctionne par cycle dans lequel nous pouvons observer trois phases (Cabeza, Martorell, Miro, Fernandez, & Barreneche, 2015) :



- La charge. Cette phase correspond au moment où la source produit de l'énergie **et** que le milieu de stockage n'est pas saturé en énergie.
- Le stockage. Cette phase correspond au moment où le dispositif de stockage ne reçoit plus d'énergie venant de la source (soit car la source n'émet plus, soit car le système de stockage est plein) **et** que le bâtiment ne demande pas d'énergie du système de stockage.
- La décharge. Cette phase correspond au moment où, afin de satisfaire ses besoins en énergie, le bâtiment puise dans le système de stockage.

Afin de concevoir un système de stockage, Tian & Zhao préconisent trois aspects sur lesquels porter notre attention :

- Les propriétés techniques du système. Ces propriétés vont assurer la faisabilité du système et définir sa performance, son rendement.

La principale propriété technique est une forte capacité thermique matériau (ou enthalpie de changement d'état ou enthalpie de réaction) du stockage. Ceci permettrait soit d'augmenter la capacité de stockage du système pour un même volume, soit de réduire le système pour une capacité de stockage fixe. Le matériau de stockage et le fluide calorifique doivent également avoir une bonne

conductivité thermique λ afin que les échanges se fassent assez rapidement et donc d'optimiser la vitesse de charge ou de décharge. L'optimisation de λ permet donc d'obtenir un système plus réactif, à plus faible inertie. Le matériau de stockage doit également être stable chimiquement afin d'obtenir un système durable dans le temps. En effet le matériau doit résister aux multiples cycles de charge et de décharge (Tian & Zhao, 2012). Cette liste de propriétés techniques annoncée par Tian et Zhao est complétée par Cabeza, Martorell, Miró, Fernández et Barreneche (Introduction to thermal energy storage (TES) systems, 2015). Ainsi le matériau doit également avoir une bonne chaleur spécifique qui, couplée à sa masse volumique, nous donne sa capacité thermique, mais également être compatible avec l'enveloppe qui le contient.

- La rentabilité qui fait rentrer le projet dans la réalité économique de notre société. Le but est de proposer une solution énergétique viable économiquement. Une solution économique viable ne signifie pas forcément une solution à bas coût ; la notion incorpore ici l'idée d'investissement et d'amortissement.

Un système de stockage comporte trois coûts principaux (Gil, et al., 2009). Premièrement, le matériau de stockage. Comme vu précédemment, ce matériau doit avoir de nombreuses qualités techniques afin d'optimiser le système de stockage. La recherche de ces spécificités pour les matériaux peut, de ce fait, nous amener à utiliser des matériaux peu conventionnels et donc chers. Le but ici est donc de rechercher un bon rapport « performance/prix ». Les deux autres coûts d'un système de stockage proviennent des échangeurs de chaleur et de l'encapsulation du système.

- L'impact environnemental. L'intérêt de développer des solutions de stockage d'énergie thermique solaire provient en partie du constat selon lequel les énergies fossiles, en plus d'être limitées, nuisent à notre écosystème. Le but n'est donc pas seulement de développer une énergie « illimitée » mais également une énergie « verte ».

Nous pouvons d'ailleurs retrouver les deux derniers critères de conception (aspect économique et environnemental) cités comme avantages d'un système de stockage (Cabeza, Martorell, Miro, Fernandez, & Barreneche, 2015, p. 2). Ici, il est question de l'intérêt d'un système de stockage dans un système énergétique déjà en place. Implémenter un système de stockage apporterait donc une optimisation économique (en réduisant les coûts d'investissement et d'exploitation), une meilleure efficacité (en optimisant l'utilisation de l'énergie), une réduction de la pollution et enfin une optimisation du système, et donc un système plus fiable.

Nous pouvons recenser trois types de stockage d'énergie thermique, actuellement :

➤ Le stockage sensible.

Il s'agit du type de stockage le plus basique : le principe est de faire monter la température du matériau de stockage, de le conserver à cette température (en minimisant les pertes) puis de récupérer la chaleur par simple transfert de chaleur. Le stockage sensible est le stockage le plus commun et une large gamme de matériaux « low-cost » ont déjà été étudiés. Les grandeurs caractéristiques d'un matériau de stockage sensible sont sa masse volumique ρ et sa capacité thermique massique C_p .

➤ Le stockage latent

Le stockage latent consiste à utiliser le changement d'état d'un matériau pour stocker l'énergie. La grandeur caractéristique du stockage latent est l'enthalpie de changement d'état que l'on notera Δ_{MCE} (MCE = matériau changement d'état). La différence Δ_{MCE} étant la plus part du temps fortement supérieure à c (environ 100 à 200 fois plus grand) (Tian & Zhao, 2012), le stockage latent permet de stocker une quantité d'énergie bien plus importante que le stockage sensible. Cependant le stockage latent implique également des difficultés techniques supplémentaires (encapsulation des matériaux, variation de volume et de pression...) qui, couplées au prix des matériaux, rendent cette solution moins accessible économiquement que le stockage sensible pour de petites installations comme le chauffage d'une habitation.

➤ Le stockage thermochimique

Le stockage thermochimique se base sur la notion de réaction endothermique et exothermique. Ainsi le principe est de chauffer des réactifs ayant une réaction endothermique, la réaction a donc lieu et l'énergie est stockée. La réaction doit être réversible afin de pouvoir, par la suite, provoquer la réaction inverse (exothermique cette fois-ci) permettant donc de récupérer l'énergie stockée. La grandeur caractéristique du stockage thermochimique est l'enthalpie de réaction. Cette grandeur est environ 100 fois plus grande que l'enthalpie de changement d'état (Tian & Zhao, 2012). Bien que cette solution présente des résultats prometteurs en termes de capacité de stockage, elle reste (encore plus que le stockage latent) difficilement abordable économiquement pour de petites installations, du fait de sa complexité technique et du prix des matériaux utilisés.

En recoupant la littérature (Gil, et al., 2009) (Pavlov & Olesen, 2011) (Hasnain, 1998) (Novo, Bayon, Castro-Fresno, & Rodriguez-Hernander, 2010) (Pinel, Cruickshank, Beausoleil-Morrison, &

Wills, 2011) (Basecq, Michaux, Inard, & Blondeau, 2013), nous pouvons distinguer les modes de stockages selon différents critères :

- L'état physique du matériau de stockage qui peut être fluide ou solide ;
- La plage de température à laquelle fonctionne le système ;
- La durée de stockage visée. On distingue ici le stockage longue durée (plusieurs semaines voire plusieurs mois pour un stockage intersaisonnier) ;
- Le « concept » de stockage : on distingue ici les systèmes directs (ou le fluide caloporteur sert de matériau de stockage) des système indirect (ou le fluide caloporteur ne sert pas de matériau de stockage).

Pour expliquer le dernier point, la notion de charge et décharge dans le cycle évoqué précédemment pourrait également être vue comme une « collecte » d'énergie que l'on va stocker puis que l'on va « livrer » au système demandeur d'énergie (un logement dans notre cas). Avec les termes « collecte » et « livraison » nous pouvons introduire la notion de fluide caloporteur. C'est ce fluide (à forte capacité thermique et coefficient de transfert thermique) qui va transporter l'énergie thermique. Ce fluide qui circule peut soit être également utilisé comme moyen de stockage, soit transférer son énergie thermique à un autre matériau qui servira de stock (Li & Chan, 2017).

1.1.1. a) Fluide caloporteur comme moyen de stockage

Le scénario idéal d'un stockage thermique serait que le fluide sortant du stock « chaud » soit à la même température que le fluide entrant dans ce stock. Cela implique deux choses :

- Le stockage se fait sans aucune perte de chaleur ;
- Le stockage est réalisé grâce au fluide caloporteur. En effet, si un autre matériau est utilisé comme moyen de stockage, une perte d'énergie au moment du transfert de chaleur, due au rendement imparfait des échangeurs, rend impossible le stockage « parfait ».

Un stockage utilisant le fluide caloporteur comme matériau de stockage est appelé système de stockage direct ; ces systèmes de stockage sont le plus souvent appliqués au stockage de chaleur sensible (Pintaldi, 2017).

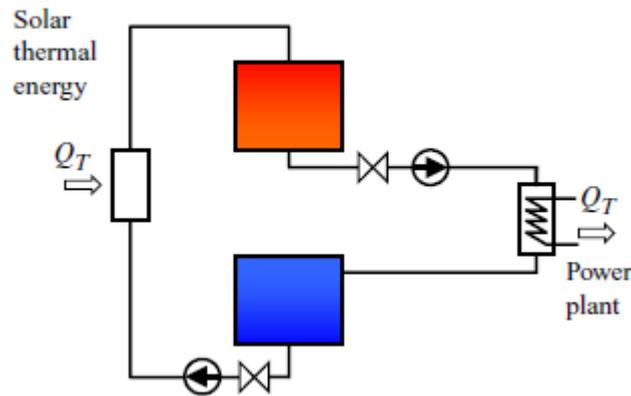


Figure 4 - Schéma de principe du stockage parfait (Li & Chan, 2017,p. 8)

Le stockage parfait impliquera donc l'utilisation de deux zones de stock. Tout d'abord le fluide caloporteur chaud est stocké dans la cuve chaude (sans pertes). Il est ensuite pompé lorsque l'habitation a besoin d'énergie. Après échange de chaleur, il stocké dans une cuve « froide ». Lorsque le stock peut être à nouveau rechargé, le fluide est pompé de la cuve froide pour être réchauffé et réinjecté dans la cuve chaude.

Ce système de stockage idéal comporte des inconvénients : il y a, en permanence, une des deux cuves non pleines car nous sommes dans un circuit fermé. Ce vide dans une des deux cuves peut donc être perçu comme un gaspillage d'espace et implique alors une mauvaise optimisation financière (payer deux cuves qui ne sont jamais pleines).

Un autre système utilisant le fluide caloporteur comme matériau de stockage peut toutefois être envisagé. Il s'agit d'utiliser la stratification thermique afin de stocker dans une même cuve le fluide froid et le fluide chaud. Nous abandonnons alors l'idée de stockage idéal.

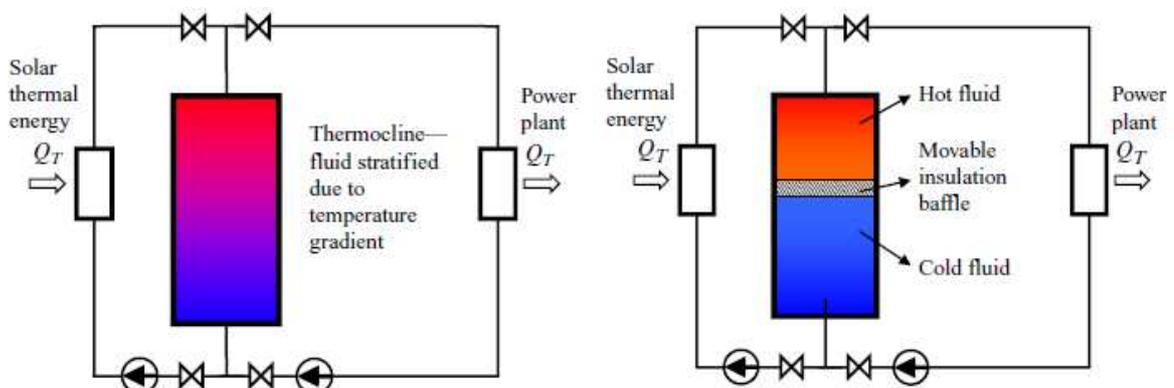


Figure 5 – Deux exemples d'un système avec fluide caloporteur comme matériau de stockage utilisant le principe de stratification thermique (Li & Chan, 2017,p. 9)

Ce système nécessite d'inverser le sens de circulation du fluide lors de la charge et la décharge. En effet, le système repose sur le principe selon lequel le fluide chaud, étant donné sa densité plus faible, va se retrouver en haut de la cuve tandis que le fluide froid stagnera dans le fond de la cuve. Il est donc nécessaire que, pendant le stock, le fluide chaud arrive dans le haut de la cuve et que l'on pompe le fluide froid dans le bas de la cuve afin de le réchauffer. A contrario, pendant la décharge, le fluide chaud sera pompé du haut de la cuve et le fluide froid, ayant cédé son énergie thermique au système sera réinjecté dans le bas de la cuve. Le schéma de gauche de la Figure 5 représente une stratification thermique « naturelle » tandis que le schéma de droite montre l'utilisation d'une membrane mobile afin de garantir la séparation chaud/froid.

Le problème d'un tel système réside en partie dans les caractéristiques du fluide caloporteur. En effet, nous avons vu précédemment qu'afin d'obtenir un système de stockage performant, le fluide caloporteur et le matériau de stockage devaient avoir des caractéristiques bien spécifiques. Ainsi, un bon fluide caloporteur n'est pas souvent un bon matériau de stockage pour des raisons de densité, de chaleur spécifique trop basse, ou de plage de températures. Ce fluide caloporteur peut également s'avérer trop cher pour être utilisé comme matériau de stockage ou encore devoir être pressurisé afin d'être à l'état liquide, ce qui demanderait un surdimensionnement de la cuve. (Li & Chan, 2017).

1.1.1. b) Fluide caloporteur et matériaux de stockage différents

La solution la plus fréquemment adoptée est donc d'utiliser un autre matériau que le fluide caloporteur comme matériau de stockage. Ce type de stockage est appelé stockage indirect (Pintaldi, 2017). Cela permet donc de sélectionner le matériau de stockage en fonction des caractéristiques que l'on souhaite mettre en avant comme une solution plus économique (matériau de stockage sensible) ou plus compacte (matériau de stockage latent).

Bien évidemment, en utilisant un matériau de stockage différent du fluide caloporteur, le système de stockage ne peut plus prétendre à être « idéal » car le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage implique une perte énergétique et donc un rendement de moins de 100%. Il faut également noter que cette perte lors du transfert de chaleur aura lieu, et à la charge, et à la décharge du système.

Le transfert de chaleur par convection entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage sera donné par la formule de Newton :

$$Q = Ah(T_1 - T_2) \quad (1)$$

Avec :

Q : l'énergie transférée [W]

A : la surface de transfert [m²]

h : le coefficient d'échange conductif [W/m²]

T₁ et T₂ : les températures du fluide et du matériau de stockage [K]

Le but est donc à la fois d'optimiser h (qui dépend des matériaux, de la vitesse du fluide, de l'état des surfaces, etc.) mais également A.

Par la suite, nous considérerons que le transfert de chaleur entre le fluide et le matériau de stockage se fera via un échangeur de chaleur que nous n'étudierons pas plus en détail.

Li et Chan (Thermal Energy Storage Analyses and Designs, 2017) comptabilisent quatre designs classiques pour une solution impliquant un matériau de stockage différent du fluide caloporteur.

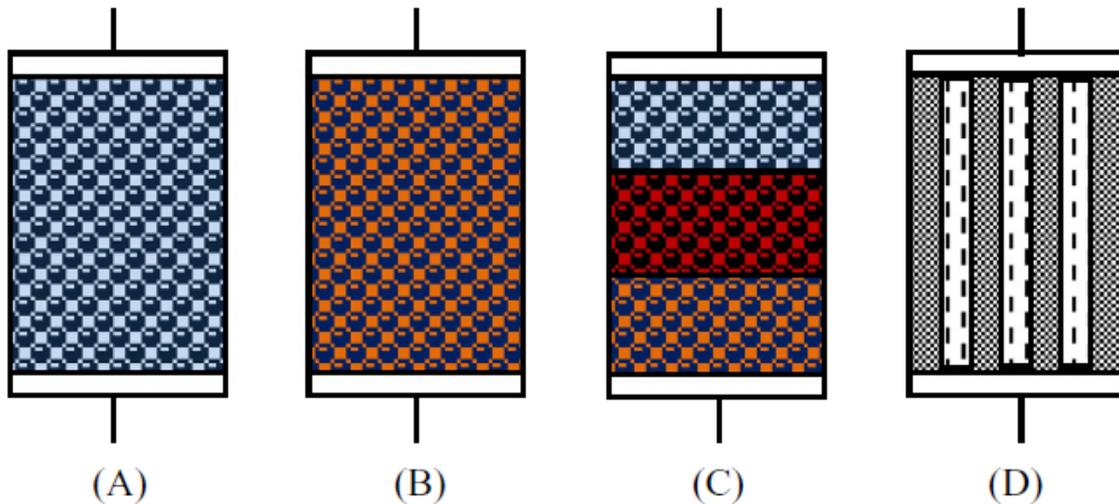


Figure 6 - Design des solutions avec matériau de stockage différent du fluide caloporteur. (Li, Chan, 2017, p. 12)

- (A) le fluide caloporteur passe au travers d'un matériau de stockage de chaleur sensible (fluide ou solide sous forme de gravier). Si le matériau de stockage est sous forme solide, le fluide caloporteur peut alors circuler directement en contact avec le gravier afin d'augmenter la surface d'échange.
- (B) le fluide caloporteur passe au travers d'un matériau de stockage de chaleur latente. Ce matériau peut être « encapsulé » afin d'augmenter la surface d'échange thermique (en l'absence d'échangeur thermique, le fluide circule directement en contact avec les capsules).
- (C) le fluide caloporteur passe au travers de plusieurs matériaux de stockage de chaleur latente. Les matériaux ayant la température de changement d'état la plus haute sont en haut de la cuve. Ainsi, au fur et à mesure que le fluide (pendant la charge) circule de haut en bas de la cuve, il refroidit en cédant son énergie thermique au premier matériau de stockage, puis arrive au second qui a une température de changement d'état inférieure, et ainsi de suite. Cette solution utilisant plusieurs matériaux de stockage latent peut également inclure une couche de matériaux de stockage d'énergie thermique sensible.
- (D) le fluide caloporteur passe au travers d'un matériau de stockage de chaleur sensible ou latente. Cette fois, le matériau de stockage est sous forme solide. Nous pouvons par exemple utiliser du béton pour le stockage sensible.

En décrivant ces quatre solutions, Li et Chan (Thermal Energy Storage Analyses and Designs, 2017) ne mentionnent absolument pas le stockage thermochimique.

1.1.2. Le stockage sensible

Notre étude s'intéresse à un système de stockage d'énergie en vue d'alimenter une habitation unifamiliale. Le but de l'opération est d'étudier la faisabilité technique mais également économique de la solution. Ainsi, au vu des conséquences économiques et techniques qu'induisent un stockage latent ou thermochimique (prix des matériaux, stabilité de l'installation, prix de l'installation, durée de vie de l'installation...), notre regard s'est rapidement tourné vers le stockage sensible.

Nous choisissons donc de développer davantage le sujet du stockage sensible et de ne pas développer les stockages latents ni thermochimiques.

1.1.2. a) Principe

Le stockage sensible se base sur la capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie lorsque sa température augmente (Dincer & Rosen, 2011). Un bon matériau pour un stockage sensible est un matériau qui possède une grande capacité thermique volumique :

$$C = \rho * C_p \quad (2)$$

C s'exprime en $J.m^{-3}.K^{-1}$. Une capacité thermique volumique $C=100$ signifie qu'un mètre cube de matériau qui subit une augmentation de température de 1K stocke 100J.

L'énergie emmagasinée lors d'un stockage de chaleur sensible est donc donné par la formule :

$$Q = V * C * (T_f - T_i) \quad (3)$$

Avec :

- Q : l'énergie stockée
- V : le volume de matériau de stockage
- C : la capacité thermique volumique du matériau de stockage
- T_i et T_f : les température initiale et finale du matériau de stockage

La mise en place d'un système de stockage sensible semble donc assez simple. Il suffit de contenir le matériau de stockage dans un réceptacle compatible chimiquement avec lui et résistant aux variations de température. Un fluide caloporteur circule ensuite dans la cuve.

En ce qui concerne le prix d'une telle solution : pour rappel, selon Gil & Al (State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation, 2009) l'aspect économique d'une solution de stockage d'énergie thermique repose sur trois composantes : le matériau de stockage, l'échangeur thermique et le contenant du matériau de stockage. Le prix du contenant peut être minimisé (par rapport au stockage latent et thermochimique) car les critères de sélection du contenant sont moins contraignants. En effet, étant donné que le matériau ne change ni d'état, ni de formulation chimique, la compatibilité chimique contenant/contenu est facilitée. De plus, les variations de pression dues aux variations de volume seront réduites (variations seulement dues à la dilatation thermique du matériau), par rapport à un matériau qui changerait d'état ou encore aux produits d'une réaction chimique.

Si le matériau de stockage est solide et est sous forme de gravier, le fluide caloporteur peut circuler directement au contact du matériau de stockage, augmentant ainsi la surface d'échange et donc l'efficacité du transfert. Cependant, une telle solution risque de rendre difficile le contrôle de la vitesse du fluide caloporteur et donc de l'échange thermique.

Pour les matériaux de stockage sensible fluide (liquide ou gaz), le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage se fait via un échangeur thermique.

Le principe de stratification thermique évoqué au paragraphe 1.1.1. a) fluide caloporteur comme moyen de stockage peut évidemment être utilisé dans le cas de stockage sensible. Un tel système permet d'améliorer le rendement de l'installation.

En fait, en l'absence de brassage de la cuve, la stratification thermique va se mettre en place d'elle-même. Il est donc nécessaire de faire circuler le fluide caloporteur dans des sens inverses, lors de la charge et de la décharge.

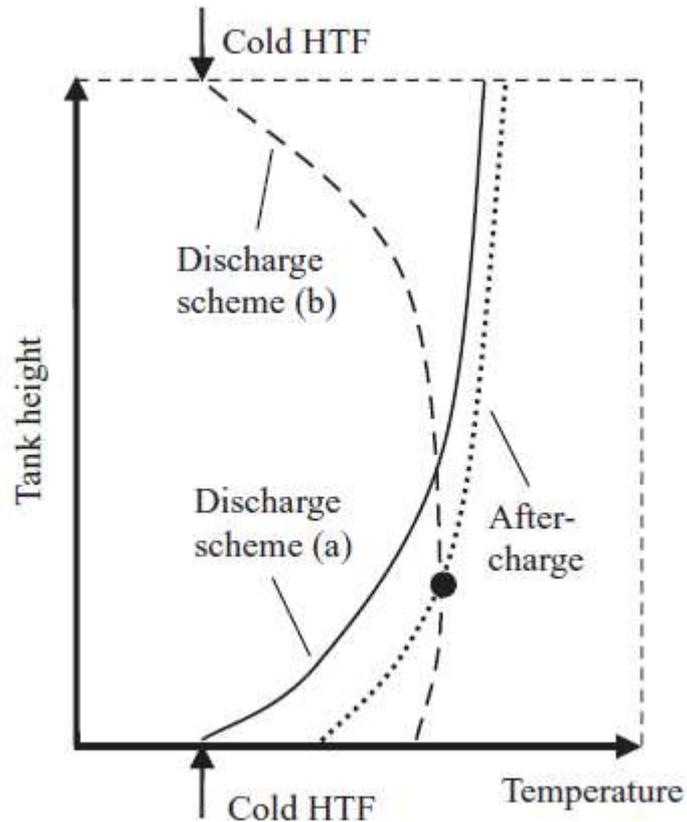


Figure 7 - Principe de charge d'un stockage comportant une stratification thermique (Li, Chan, 2017, p. 11)

Sur la 7 ci-dessus, la courbe en pointillés montre la température de la cuve après la charge. La température est donc plus basse en partie inférieure qu'en partie supérieure de la cuve.

Dans le scénario de décharge (a), le fluide caloporteur entre dans la cuve par le bas. Il se charge en énergie et se réchauffe de plus en plus à mesure qu'il progresse vers le haut de la cuve. On voit que la courbe de décharge (a) rejoint de manière asymptotique la courbe de température de la cuve.

Dans le scénario de décharge (b), le fluide caloporteur entre dans la cuve par le haut. Au moment de son entrée, la différence de température entre le fluide caloporteur et le matériau de la cuve est importante (plus importante que dans le scénario (a)) ; ce type de fluide se charge donc rapidement en énergie et sa température monte à mesure qu'il circule vers le fond de la cuve. Cependant, la température de la cuve diminuant dans le fond, le fluide caloporteur risque d'atteindre la même température que le matériau de stockage. A ce moment-là, le fluide caloporteur ne se charge plus en énergie thermique, ce qui diminue le rendement du système.

Dans un stockage sensible, les pertes se font par pertes thermiques sur les parois de la cuve de stockage. Ainsi, l'isolation thermique de ces parois joue un rôle fondamental sur les performances du système (l'hypothèse du « stockage idéal » incluait une isolation parfaite et donc pas de perte pendant la phase de stockage).

Une isolation parfaite étant impossible, il faut à la fois maximiser l'isolation de la cuve (réduire son coefficient de transmission thermique U) et maximiser sa compacité.

Cependant, comme vu précédemment, un bon moyen pour améliorer un système de stockage sensible utilisant un fluide comme matériau de stockage est de jouer sur la stratification thermique. Or, afin d'augmenter la stratification thermique, il serait préférable de choisir une cuve élancée en hauteur afin d'obtenir un gradient de température plus importante. Or, une cuve élancée est contradictoire avec une cuve compacte (dont la forme idéale serait donc une sphère). La subtilité est donc de trouver un équilibre afin de limiter la surface de déperdition, tout en assurant une bonne stratification thermique.

Un autre facteur jouant également dans les pertes thermiques au niveau des parois est le rapport d'échelle. En effet prenons une cuve A et une cuve B qui serait la cuve A affectée d'un rapport d'échelle x ($x > 1$). La surface de déperdition de la cuve B est plus grande que celle de la cuve A ; ses pertes thermiques sont donc plus importantes. Cependant, si l'on rapporte ces pertes thermiques à l'énergie stockée dans la cuve (qui dépend du volume), ce ratio est proportionnel au rapport Surface de déperdition/Volume. Or, ici, c'est la cuve B qui possède le ratio le plus bas. Par exemple, pour une sphère, ce ratio est de $3/R$ avec R le rayon de la sphère.

Une cuve plus grande serait donc plus chère (doublement car elle impliquerait également un plus grand volume de matériau de stockage à acheter) mais aurait un meilleur rendement.

1.1.2. b) Matériaux

Les performances d'un matériau de stockage de chaleur sensible peuvent être évaluées grâce à quatre critères (Cabeza, Sole, Castell, Oro, & Gil, 2012) (Dincer & Rosen, 2011) :

- Sa conductivité thermique λ : cette caractéristique représente la quantité d'énergie transférée par unité de surface et de temps, lorsque le matériau est soumis à un delta de température de 1K. Cette grandeur est importante dans les systèmes de stockage indirects (lorsque le fluide caloporteur ne sert pas de matériau de stockage) car elle permet un transfert de chaleur rapide et efficace entre les deux matériaux. Cela permet au système d'avoir une faible inertie et donc de répondre rapidement aux besoins.
- Sa capacité thermique volumique C : cette caractéristique est à optimiser si l'on souhaite maximiser l'énergie stockée par unité de volume.
- Sa capacité thermique massique C_p : cette caractéristique est à optimiser si l'on souhaite maximiser l'énergie stockée par unité de masse.
- Son coût par unité d'énergie : comme discuté auparavant, le but d'un stockage d'énergie thermique est également d'être en accord avec la situation économique actuelle du domaine de l'énergie, voire même de l'améliorer. Le coût par unité d'énergie peut donc être calculé soit comme étant le produit de la capacité thermique volumique et du prix du matériau au m^3 , soit en multipliant la capacité thermique massique par le prix du matériau au kilogramme.

Afin de choisir le bon matériau nous pouvons également ajouter un autre critère : la gamme de température dans laquelle il est stable. En effet, comme nous travaillons sur le stockage sensible, le matériau reste dans le même état. Par exemple, la gamme de température pour utiliser l'eau comme matériau de stockage (à pression atmosphérique) est 20°C-95°C (Bascq, Michaux, Inard, & Blondeau, 2013). Le choix de la gamme de température est très important ; il doit être compatible avec le collecteur que l'on met en place et la gamme de température du fluide caloporteur.

De manière générale, les matériaux de stockage sensible solides peuvent fonctionner à des plages de températures très élevées (plusieurs centaines de degré Celsius), ont un faible coût par unité d'énergie et possèdent de bonnes conductivités thermiques λ , ce qui pourrait rendre leur utilisation intéressante dans des installations comme les centrales solaires. Cependant, ces matériaux ont

souvent une capacité thermique volumique faible, ce qui génère des volumes de stockage bien trop grands pour être envisageables dans la plupart des cas (Tian & Zhao, 2012).

En synthétisant nos revues relatives à cette étude, nous pourrions citer les matériaux suivants comme étant assez usuel dans le domaine du stockage d'énergie sensible.

Matériaux	Température de fonctionnement (°C)	densité (kg/m ³)	λ (W/mK)	Cp (kJ/kgK)	C (kJ/m ³ K)	Coût \$/kWh
Sable et roche	300	1700	1	1,3	2160	4.2
Béton	400	2200	1,65	0,85	1872	1
Fonte	400	7200	37	0,56	4032	32
NaCl	500	2160	7	0,85	1836	1.5
Acier	700	7800	40	0,6	4680	60
Briques réfractaire Silica	700	1820	1,5	1	1836	7
Briques réfractaire magnésite	1200	3000	5	1,15	3456	6
Huile synthétique	350	900	0,11	2,3	2070	117.4
Eau	20-95	1000	0,58		4182	0.02
Graphite	200	1600	80	1,2	1920	189.8

Tableau 1 - Caractéristiques des matériaux de stockage sensible usuels

Nous pouvons voir, dans ce tableau synthétique, que les matériaux les plus économiquement viables actuellement sont les matériaux les plus communs comme le béton, les briques réfractaires ou encore évidemment l'eau. Un cas particulier est celui du NaCl qui est particulièrement intéressant au niveau coût (toujours moins que l'eau) mais qui a l'avantage de fonctionner à de hautes températures et d'avoir un λ bien supérieur à celui de l'eau. Nous retrouverons alors assez souvent ce matériau dans le domaine du stockage sensible.

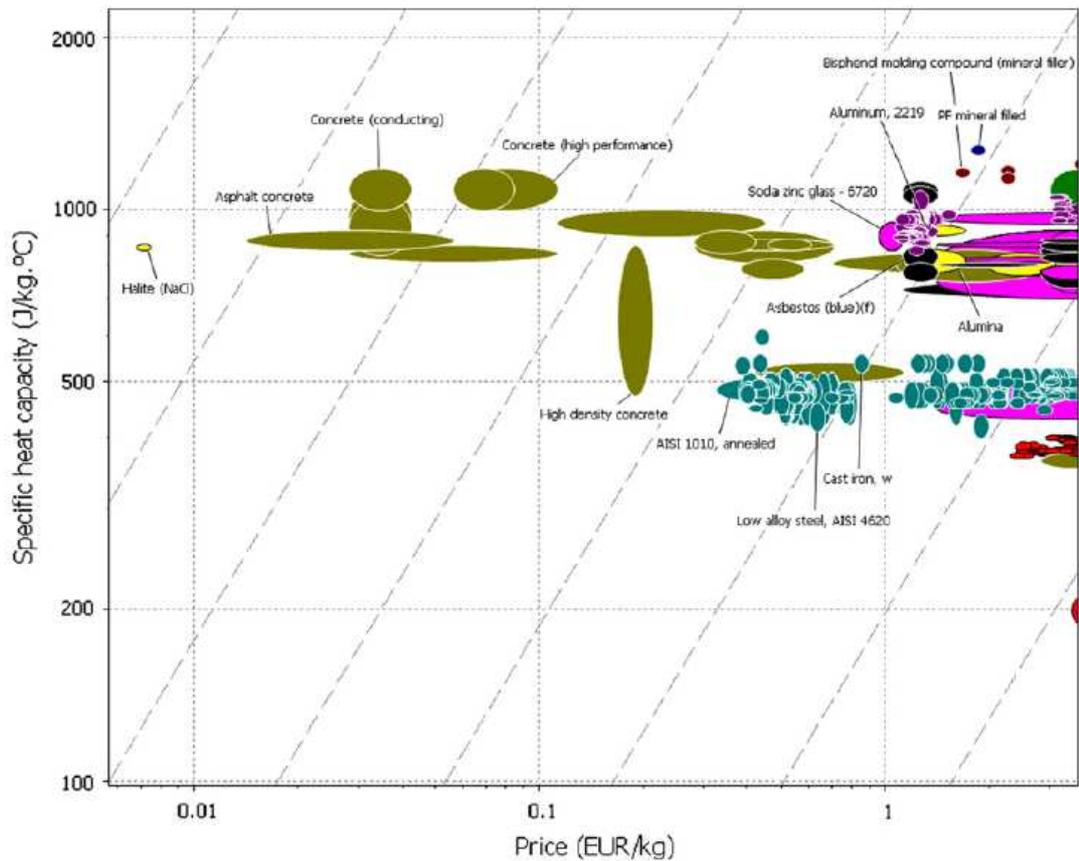


Figure 8 - Chaleur spécifique massive en fonction du coût au kg (Fernandez, Martinez, Segarra, Martorell & Cabeza, 2010)

Ce graphique illustre la capacité de stockage des matériaux en fonction de leur coût au kg (Fernandez, Martinez, Segarra, Martorell, & Cabeza, 2010). Cependant, une sélection des matériaux a été faite au préalable. Les matériaux représentés ici possèdent tous un λ supérieur à 1W/mK . De plus, ces matériaux ont des températures de fonctionnement comprises entre 150 et 200°C . L'eau, présentée auparavant comme le matériau le plus adéquat, n'est donc pas mentionnée ici. Nous retrouvons, cependant, des matériaux comme le béton ou l'asphalte dans la partie supérieure gauche du tableau, partie traduisant le meilleur rapport stockage/coût.

1.1.2. c) Stockage dans une cuve d'eau

Pour un usage domestique, l'eau reste le matériau le plus utilisé comme stockage sensible, du fait de ses capacités thermiques (massique et volumique) très élevées, de son faible coût et de sa disponibilité (Dickinson, Cruickshank, & Harrison, 2012).

L'utilisation la plus courante pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire d'une habitation est de stocker l'énergie dans une cuve d'eau isolée. La taille de la cuve de stockage peut varier d'une cuve standard de 270L (seulement pour l'eau chaude sanitaire) jusqu'à des capacités bien supérieures atteignant plusieurs dizaines de mètres cubes (Cabeza, Martorell, Miro, Fernandez, & Barreneche, 2015).

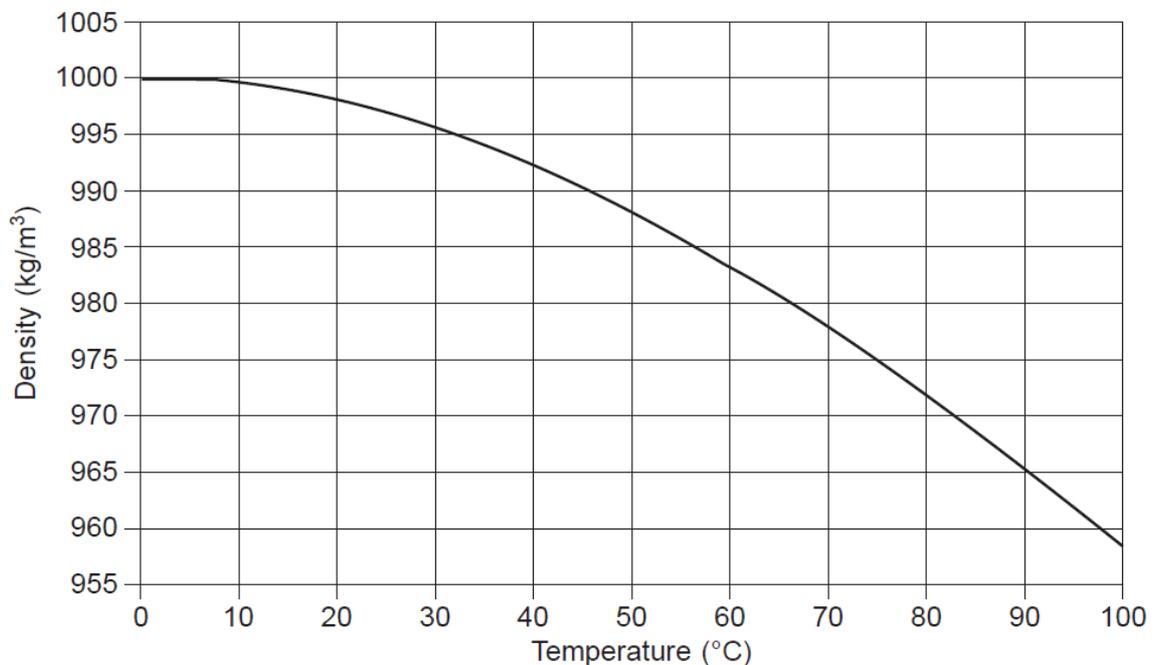


Figure 9 - Evolution de la densité de l'eau en fonction de la température

L'eau chaude étant moins dense que l'eau froide, un phénomène de stratification thermique va se produire. Le but de l'installation est de conserver cette stratification en faisant entrer le circuit du fluide caloporteur venant du collecteur solaire par le haut de la cuve et en le faisant ressortir par le bas. Inversement, lors du déstockage, le fluide caloporteur doit sortir par le haut de la cuve et être réinjecté par le bas. Une étude menée par S. Ievers et W. Lin (Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank, 2009) a montré qu'un décalage des entrées et

sorties de la cuve de 150mm entraînait une réduction de la stratification de 28% et qu'un décalage de 300mm entraînait une réduction de la stratification de 72%.

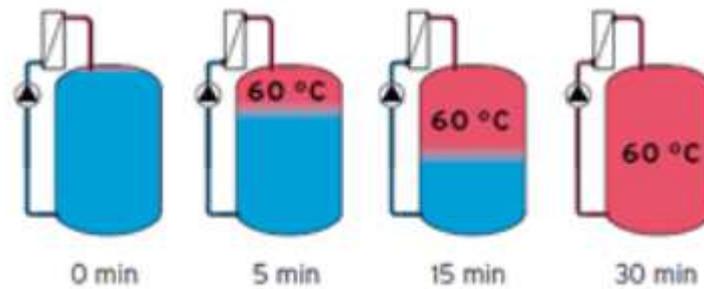


Figure 11 - Principe de stratification du stock d'eau chaude (elyotherme.fr, s.d.)

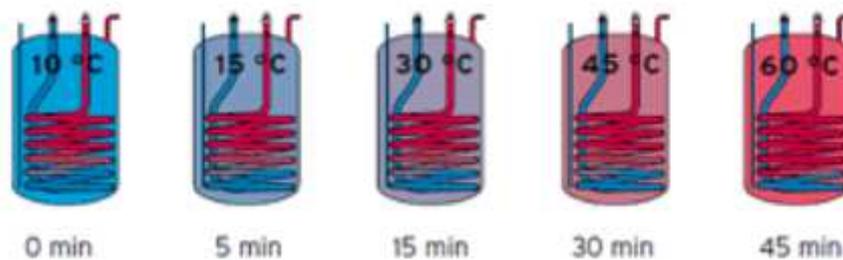


Figure 10 - Stock d'eau chaude sans stratification (elyotherme.fr, s.d.)

L'importance de l'emplacement des entrées et sorties de la cuve est également soulignée par S. Furbo (Using water for heat storage in thermal energy storage (TES) systems, 2015).

La géométrie de la cuve va également influencer stratification à l'intérieur de celle-ci. En effet, une cuve plus élancée (ratio hauteur sur diamètre plus élevé) aura une meilleure stratification. Ainsi, en passant d'un ratio de 2,5 à 3, la stratification thermique de la cuve est augmentée de 22,6% et en passant d'un ratio de 2,5 à 5, la stratification est augmentée de 30,7%. (Ievers & Lin, 2009). Ievers & Lin recommandent un ratio de 3,5 afin d'obtenir un bon degré de stratification dans la cuve. Cependant, augmenter ce ratio augmente également la surface de déperdition pour un même volume. C'est pourquoi Ievers et Lin (Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank, 2009) préconisent un ratio de 3,5 afin d'optimiser la stratification tout en n'augmentant pas drastiquement les pertes thermiques.

D'ailleurs, tout comme le degré de stratification, Furbo (Using water for heat storage in thermal energy storage (TES) systems, 2015) cite les pertes thermiques comme l'une des quatre caractéristiques principales d'un stockage par cuve d'eau.

Le but est donc de minimiser ces pertes thermiques en isolant bien la cuve avec un matériau ayant une très faible conductivité thermique. Cependant, grâce à la stratification, la cuve peut éventuellement être isolée de manière non homogène.

En effet, les pertes étant proportionnelles à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la cuve, elles seront plus importantes dans la partie supérieure de la cuve où l'on retrouve l'eau chaude. Ainsi il faut, en priorité, isoler le haut de la cuve (Furbo, 2015).

Cependant, une isolation non homogène est bien souvent plus compliquée à mettre en place qu'une isolation homogène, et selon les proportions de la cuve, pas spécialement avantageuse économiquement. En effet, en n'isolant que le haut de la cuve, on se place dans un scénario où le bas de la cuve ne sera jamais chaud car, sinon, on serait face à de trop grandes pertes thermiques (pas d'isolation + grande différence de température). Ainsi, n'isoler que le haut de la cuve revient à se placer dans une configuration où notre volume de stockage est surdimensionné la plupart du temps et n'est donc pas optimisé économiquement.

A défaut de n'isoler que le haut de la cuve, Furbo (Using water for heat storage in thermal energy storage (TES) systems, 2015) préconise de placer si possible les ponts thermiques dus à la mise en œuvre de l'isolation en bas de la cuve afin de réduire les pertes au maximum.

Les deux autres caractéristiques principales d'un stockage par cuve d'eau selon Furbo sont la capacité de stockage (qui dépend directement du volume et de la température puisque le matériau est déjà choisi) et les coefficients d'échange thermique entre le fluide caloporteur et l'eau dans le sens de la charge, et entre l'eau et le fluide caloporteur dans le sens de la décharge.

Dans le sens de la charge, le coefficient d'échange doit être assez élevé afin de ne pas réduire le rendement de l'installation. Dans le sens de la décharge, un coefficient élevé permet de fournir assez de puissance à l'habitation (tant pour l'eau chaude sanitaire que pour le système de chauffage).

II. Méthodologie

Dans ce chapitre méthodologie, nous présenterons et motiverons nos choix quant au système de base étudié. Ce système comprend :

- Une habitation modèle qui, placée dans son environnement ainsi que soumise à une utilisation, génère des besoins en chauffage. Cette habitation, une fois définie, ne sera pas modifiée par la suite.
- Un système de stockage d'énergie thermique latente alimenté par des panneaux solaires thermiques, et qui vise à répondre à une partie des besoins en chauffage de l'habitation.

Afin d'étudier seulement les performances du système de stockage, nous définirons un système « de base » et ferons ensuite varier ses caractéristiques afin d'observer leur impact sur les performances du stockage.

Le but étant également de donner une idée de l'impact économique d'une telle installation, nous nous servirons du travail effectué par le LAPT de l'université de Liège dans le cadre de son étude « Rapport coûts/bénéfices des différents niveaux de performances énergétiques des bâtiments neufs » pour la commune de Villers-le-Bouillet. En effet, lors de cette étude le LAPT a évalué l'impact financier de plusieurs systèmes de chauffage sur une habitation « type ». Nous nous servirons donc de son étude économique afin de pouvoir y comparer nos résultats.

Afin d'observer nos résultats, nous modéliserons notre système via le logiciel TRNSYS et TRNBuild. Les résultats du logiciel seront ensuite mis en forme pour être discutés.

II.1. Définition du système

II.1.1. Choix du système de stockage

Comme indiqué précédemment, le système général comprend :

- Un ensemble de collecteurs. Nous ne jouerons pas sur les performances des collecteurs et utiliserons des données constructeur. Cependant nous essayerons de faire varier la surface des collecteurs ;
- Une habitation qui génère des besoins ;
- Un système de stockage de chaleur latente. C'est sur ce système que nous allons jouer afin de générer plusieurs scénarios.

Le système de stockage étudié s'inspire d'une installation mise en place par Monsieur Wallenberger, ancien pilote autrichien à la Lufthansa, venu s'installer en France à la fin des années 1970. Lors de notre rencontre avec R. Wallenberger, il nous a parlé de son installation et de ses performances.

Mis en place dès son arrivée dans le sud de la France (Cadenet, Vaucluse), inspiré de ce qu'il se faisait en Autriche, son système permet à son habitation de 144 m² d'être autonome au niveau du chauffage depuis 1979. Cette prouesse, bien qu'elle doive être modérée par la clémence du climat provençal, a donc attisé notre curiosité. Nous avons donc choisi d'étudier son système comme système « de base » en l'adaptant (au niveau des dimensions) à notre maison type.

Le système installé par R. Wallenberger est une cuve cylindrique de 4900 litres, de diamètre 1,2 m entourée de 50 cm de sable minimum, puis isolé par 10 cm d'isolant alimenté par 23m² de panneaux solaires thermiques. Le tout est enterré à 4 m dans le sol (fond du système, le haut du système étant à environ 2 m de la surface).

Le système de stockage est composé de la sorte :

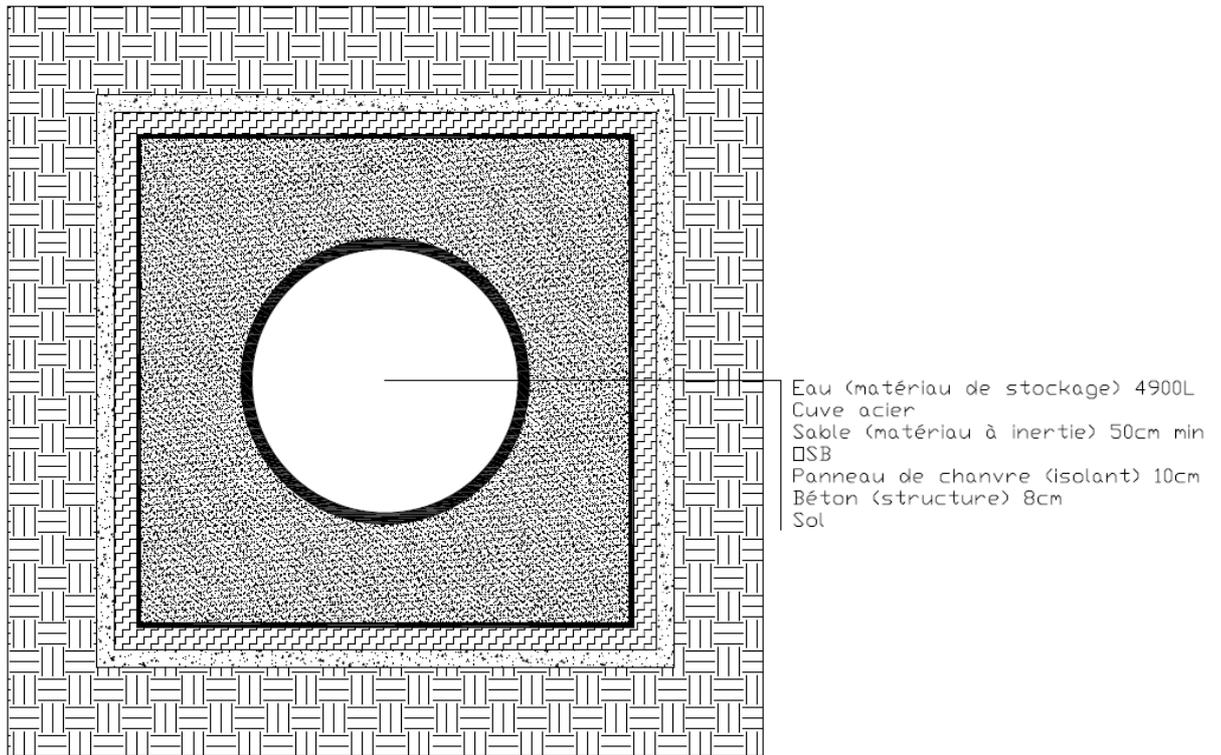


Figure 12 - Schéma de principe du stockage de base

Cette composition représentera donc notre cas de base. Nous allons, ensuite, faire varier ce cas de base, créant ainsi différentes versions du système de stockage, afin d'étudier l'impact de chaque caractéristique du système sur ses performances.

La seule chose que nous changerons au cas de base est la capacité de la cuve. En effet, cette capacité semble très faible et semble fortement liée au climat chaud du sud de la France. Notre étude se plaçant dans le cadre du climat Wallon, nous allons surdimensionner la cuve dès le départ. Nous prendrons donc, pour notre cas de base, une cuve de 8000 L mais conserverons le rapport hauteur sur diamètre (dont l'importance a été soulevée lors de notre revue de la littérature (levers & Lin, 2009)) de l'installation de R. Wallenberger ainsi que son rapport volume de stockage/surface de panneaux solaires thermiques.

II.1.2. Choix de l'habitation

Le choix de l'habitation va définir les besoins auxquels notre système de stockage devra répondre. En effet, il est important de bien définir l'environnement de notre système afin d'obtenir des résultats cohérents. Le but d'un stockage de chaleur est de palier le déphasage entre demande d'énergie et production d'énergie par la source. Ce déphasage est particulièrement marqué dans le secteur résidentiel où les besoins sont principalement concentrés aux moments où le soleil, apport gratuit, ne brille pas. En effet, l'activité d'une habitation se développe principalement (hors période de vacances) le soir, la nuit et le matin.

Au vu de la situation résidentielle actuelle wallonne, l'habitation de demain semble plutôt ressembler à un appartement. Cependant, en recoupant notre étude de l'énergie appliquée au secteur résidentiel Wallon et notre étude des systèmes de stockage de chaleur pour habitations, il semblerait plus adéquat de choisir une maison quatre façades pour définir les besoins auxquels notre système devra répondre. En effet, l'étude d'AQUAWAL et du CEHD (Etude sur les consommations résidentielles d'eau et d'énergie en Wallonie, 2015) et l'Etat de l'Environnement Wallon (Etat de l'Environnement Wallon, 2018), nous informe que les habitations unifamiliales comme les maisons quatre façades sont plus propices à utiliser une source d'énergie plus « individuelle » (comme par exemple utiliser du bois de chauffage ou une cuve à mazout individuelle). Or, la solution que nous étudions repose sur l'utilisation d'une cuve afin de stocker l'énergie, un peu à la manière d'une cuve à mazout.

Nous pourrions penser qu'afin de correspondre à une solution plus « collective » il nous suffirait d'augmenter la capacité de la cuve, surtout lorsque l'on se souvient que, dans le cas d'un stockage latent où les pertes se font par les parois de la cuve, les performances du système augmentent avec le volume de stockage. Cependant, afin d'augmenter le volume de stockage, il faudrait également augmenter la surface des collecteurs. Or, la conséquence directe de l'habitat collectif (qui répond à la demande de densification urbaine) est la réduction de la surface au sol par habitant. Ainsi, nous ne pourrions certainement pas augmenter la surface de collecteur proportionnellement à l'augmentation du volume de stockage.

Notre choix se portera donc sur une maison individuelle quatre façades. Ce choix permet également d'inclure, dans notre proposition, à la fois les nouvelles et les anciennes habitations qui, à

l'occasion d'une rénovation thermique, pourraient inclure une solution d'énergie renouvelable dans leur système énergétique (Qualit'EnR, 2018).

Afin de définir les caractéristiques de notre maison, nous nous appuyons simultanément sur le rapport fait par le LAPT pour la commune de Villers-le-Bouillet (Dupont & Hauglustaine, 2007) ainsi que sur un rapport de du LAPT et de la FPMs traitant des performances énergétiques des bâtiments en région Wallonne (Nourricier, et al., 2006).

Dans le cadre de l'étude « Construire avec l'énergie », une base de données recensant 173 habitations en Wallonie a été constituée en 2007. Ces 173 habitations comprenaient tous les types de logements (appartements, maison 2 façades, 3 façades, 4 façades).

Cette base de données a ensuite été étudiée par l'ULiège et la FPMs . Ils en ont dégagé une maison quatre façades « moyenne » en se basant sur 5 paramètres :

- La surface de déperdition totale A_t ;
- La surface de plancher chauffé brute (comprise dans V) A_{ch} ;
- Le volume protégé V ;
- Le rapport surface vitrée, surface de plancher chauffé S_v / A_{ch} ;
- Le rapport surface vitrée, surface des façades S_v / A_f ;
- La compacité volumique (V/A_t) .

En étudiant les caractéristiques des 173 cas, puis en excluant 8 cas extrêmes, il est ressorti une maison quatre façades dont tous les paramètres sont à +-20% de la moyenne.

Le LAPT s'est ensuite basé sur cette maison, baptisée « la maison fil rouge », afin de réaliser son étude pour la commune (Dupont & Hauglustaine, 2007). Le laboratoire s'est alors servi de la maison fil rouge comme d'un « cas de base » afin de faire ensuite varier certains paramètres, comme le niveau d'isolation ou le système de chauffage, pour obtenir un panel de solutions qu'il a ensuite étudié sous un double aspect énergétique et économique.

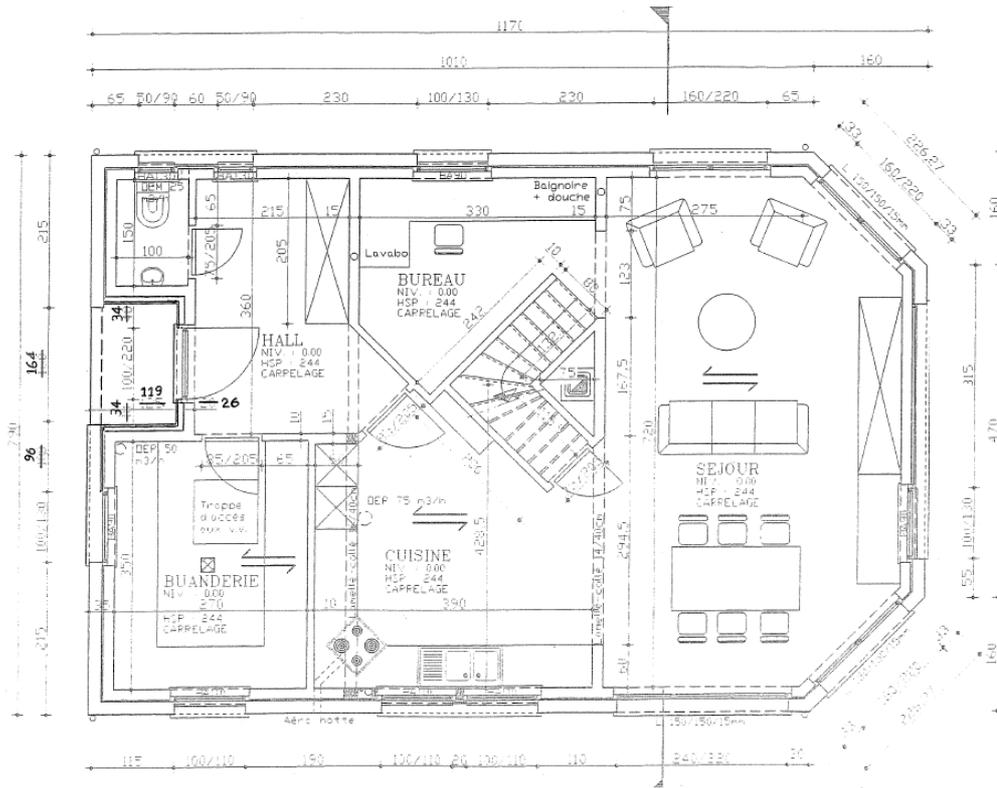


Figure 13 - Plan du RDC de la maison fil rouge

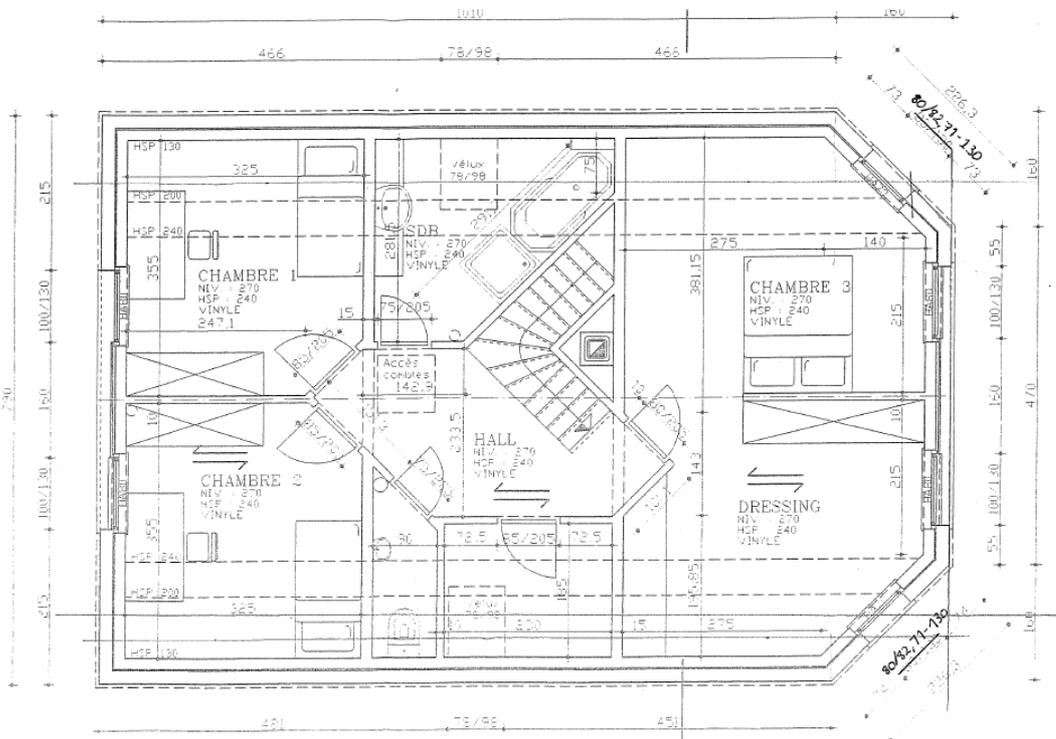


Figure 14 - Plan du R+1 de la maison fil rouge

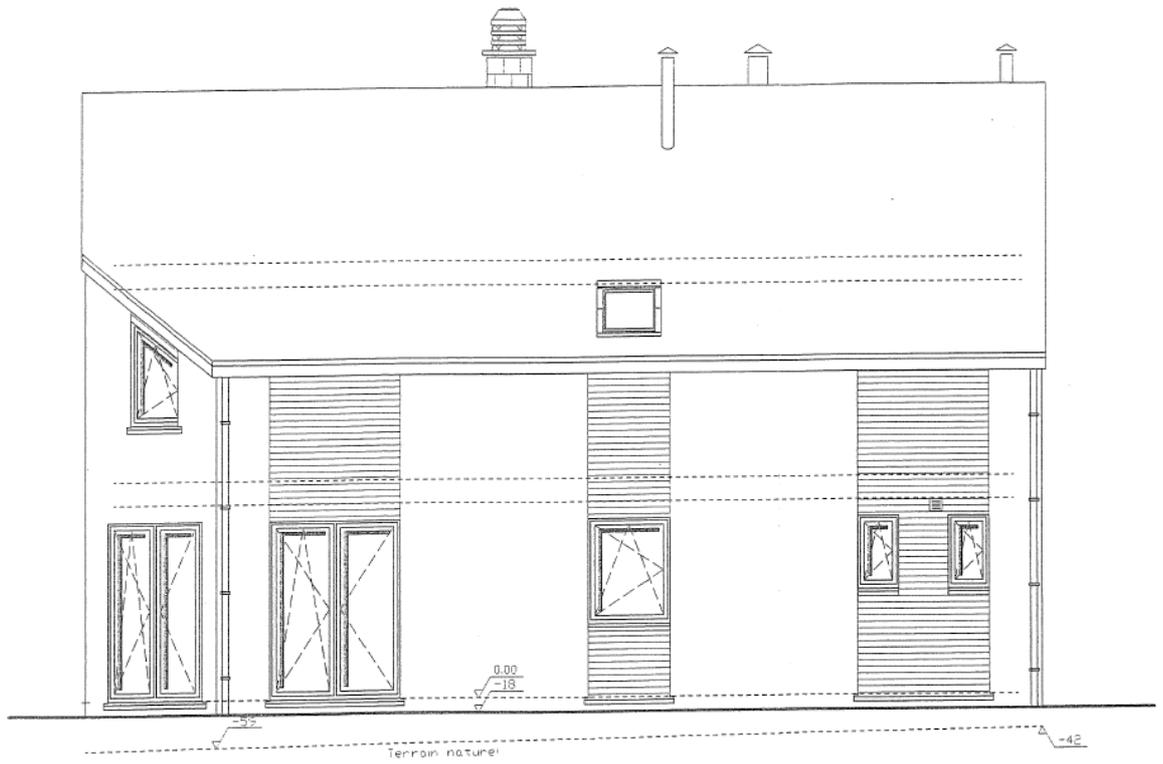


Figure 15 - Façade Nord



Figure 17 - Façade Est

Figure 16 - Façade Ouest



Figure 18 - Façade Sud

Comme nous l'avons vu, la « maison fil rouge » ne constitue un cas moyen représentatif uniquement en conséquence de ses caractéristiques de composition de façade et de volumétrie. Cependant, nous allons utiliser une des variantes proposées dans l'étude pour la commune. Cette variante comportera donc les mêmes caractéristiques de A_t , A_{ch} , V , S_v/A_{ch} , S_v/A_f , V/A_t , que la « maison fil rouge », mais aura un niveau d'isolation correspondant aux normes actuelles.

Cas	Niveau d'isolation thermique globale K	Système de ventilation	Etanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment	Système de chauffage	Système pour l'eau chaude sanitaire	Installation solaire thermique	Installation solaire photovoltaïque
1	55	A	par défaut	chaudière mazout basse température	couplé à la chaudière	-	-
2	43	C	par défaut	chaudière mazout à condensation	couplé à la chaudière	-	-
3	43	C	par défaut	chaudière pellets à condensation	couplé à la chaudière	-	-
4	43	D	4 m ² /hm ²	chaudière mazout à condensation	couplé à la chaudière	-	-
5	34	D	4 m ² /hm ²	chaudière mazout à condensation	couplé à la chaudière	-	-
6	34	D	4 m ² /hm ²	pompe à chaleur sol/eau	couplé à la pompe à chaleur	-	-
7	34	D	4 m ² /hm ²	chaudière pellets à condensation	couplé à la chaudière	-	-
8	27	D	4 m ² /hm ²	chaudière mazout à condensation	couplé à la chaudière	-	-
9	27	D	4 m ² /hm ²	pompe à chaleur sol/eau	couplé à la pompe à chaleur	-	-
10	27	D	4 m ² /hm ²	chaudière pellets à condensation	couplé à la chaudière	-	-
11	27	D	4 m ² /hm ²	chaudière mazout à condensation	couplé à la chaudière	14 m ² de panneaux solaires thermiques orientés sud à 40° pour couvrir 30 % des besoins combinés d'eau chaude sanitaire et de chauffage	-
12	27	D	4 m ² /hm ²	chaudière mazout à condensation	couplé à la chaudière	-	Installation de 1300 Wc (environ 10 m ²) orientée sud à 40°
13	18	D	0,8 m ² /hm ²	poêle à pellets	boiler électrique	4 m ² de panneaux solaires thermiques orientés sud à 40° pour couvrir une partie des besoins d'eau chaude sanitaire	-

Figure 19 - 13 cas étudié pour la commune de Villers-le-Bouillet

Le niveau d'isolation thermique de notre habitation quatre façades sera le niveau correspondant aux cas 8, 9 et 10. Nous prendrons également la même étanchéité à l'air et les mêmes compositions de parois. En choisissant un K de 27, nous pourrions légitimement comparer notre solution aux cas 8, 9 et 10, qui fonctionnent respectivement grâce à une chaudière mazout à condensation, à une pompe à chaleur sol/eau (PAC) et à une chaudière pellets à condensation. Ainsi, nous aurons une idée des performances de notre système par rapport à une solution de stockage « traditionnelle » (mazout), ainsi que par rapport à des solutions plus vertes comme celle des pellets ou de la PAC.

Notre habitation aura donc les caractéristiques suivantes :

- $A_t=408 \text{ m}^2$;
- $V=551 \text{ m}^3$;
- $V/A_t=1,35$;
- $A_{ch}=178 \text{ m}^2$;
- $S_v=34 \text{ m}^2$ dont 28% au sud, 12% à l'est, nord-est et sud-est et 18% au nord et à l'est ;
- $K=27$;
- Etanchéité du bâtiment = $4\text{m}^3/\text{hm}^2$.

Pour les parois, nous utiliserons les compositions suivantes :

Type de parois	Type d'isolant	U Parois (W/m ² K)	Epaisseur isolant (m)
Châssis bois+vitrage		1,7	
Murs ossature bois	Cellulose insufflée	0,14	0,22
Toiture inclinée	Cellulose insufflée	0,15	0,22
Plancher sur V.V.	Polystyrène	0,28	0,1
Plancher au-dessus ext	Polystyrène	0,28	0,1

Tableau 2 - Composition des parois

II.2. Définition des scénarios et évaluation des performances

II.2.1. Le matériau de stockage

Le matériau de stockage utilisé est l'eau. Au vu de la littérature étudiée, nous avons choisi de ne pas faire varier ce paramètre. En effet, l'eau semble être le matériau le plus adéquat pour ce type de stockage, tant au niveau performance technique qu'économique.

II.2.2. Le matériau à inertie

La spécificité du système de monsieur Wallenberger, que nous ne retrouvons pas dans la littérature, est l'utilisation d'un matériau à inertie assez forte comme du sable, ici servant de tampon entre le stock d'énergie dans l'eau en l'isolant. Il semblerait que le but d'un tel système serait de limiter les pertes tout en assurant un maximum de stockage. Selon monsieur Wallenberger, le choix du sable est un choix économique technique et pratique. En effet, le sable a une bonne inertie, il est bon marché et surtout facile à mettre en œuvre. Nous étudierons, cependant, d'autres matériaux à bonne inertie thermique dans notre cas :

- Le béton. Ce matériau est également facile à mettre en œuvre et possède une bonne inertie ainsi qu'une bonne capacité de stockage. Le désavantage, par rapport au sable, réside dans l'irréversibilité de son installation ;
- Les briques pleines en terre cuite. Ce matériau possède également de bonnes performances thermiques. Cependant, sa mise en place ne permettra pas de faire le lien entre la cuve cylindrique et le bloc général isolé de forme parallélépipédique.

En discutant avec monsieur Wallenberger, nous avons appris que des installations semblables sont utilisées en Autriche, et certains remplacent le sable par d'autre matériau tel que la sciure de bois. Finalement, il semblerait que certains préféreraient améliorer l'isolation générale de la cuve de stockage plutôt que de jouer sur l'inertie. Nous essayerons donc également de remplacer le sable par un matériau isolant.

II.2.3. Le matériau isolant

Nous ne ferons pas varier le type d'isolant. En effet, le principe de l'isolation est bien connu et réside dans le λ du matériau. Ainsi, le choix du matériau, assez facile, est laissé aux futurs installateurs

qui le sélectionneront en fonction soit de ses performances, de son prix, de sa facilité de mise en œuvre ou encore de sa composante écologique. Nous avons choisi, dans notre cas, de prendre du chanvre et ne ferons varier que son épaisseur.

II.2.4. La géométrie du système

Nous ferons également varier la géométrie du système.

- L'orientation de la cuve. En effet, l'installation de monsieur Wallenberger suppose une cuve cylindrique assez longue posée horizontalement. La stratification thermique est donc minime dans son installation. Après étude de la littérature, nous ne pouvons nous empêcher de nous interroger sur l'impact de l'installation de la cuve à la verticale, en vue d'obtenir une bonne stratification, sur le fonctionnement du système ;
- L'échelle du système. Nous étudierons, ici, l'impact d'un surdimensionnement ou au contraire d'un sous-dimensionnement.

II.2.5. Évaluation des performances

Afin d'évaluer les performances de chaque scénario, nous allons confronter deux données :

- Le pourcentage des besoins de l'habitation que l'installation peut couvrir ;
- L'investissement de départ qui correspond au coût de l'installation.

Le coût de l'installation prendra en compte :

- Les matériaux nécessaires ;
- Le prix unitaire de la cuve ;
- Le coût des travaux de terrassement ;
- Le coût des panneaux solaires thermiques, en prenant en compte les aides de la région Wallonne.

Après avoir évalué chaque scénario, nous ferons plusieurs regroupements. Dans un premier temps, nous comparerons les scénarios où un seul paramètre change (en regroupant par exemple les scénarios où la couche d'inertie n'est pas la même), puis nous réaliserons une synthèse de tous les résultats.

Scénario	Isolant	e (cm)	Inertie	e (cm)	Volume (m3)	hauteur (m)	rayon (m)	ratio h/d	position
0	chanvre	10	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
1	chanvre	10	x	x	8.0	4.8	0.73	3.3	h
2	chanvre	10	sable	20	8.0	4.8	0.73	3.3	h
3	chanvre	10	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
4	chanvre	10	sable	60	8.0	4.8	0.73	3.3	h
5	chanvre	10	béton	20	8.0	4.8	0.73	3.3	h
6	chanvre	10	béton	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
7	chanvre	10	béton	60	8.0	4.8	0.73	3.3	h
8	chanvre	10	brique	20	8.0	4.8	0.73	3.3	h
9	chanvre	10	brique	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
10	chanvre	10	brique	60	8.0	4.8	0.73	3.3	h
11	chanvre	10	cellulose	20	8.0	4.8	0.73	3.3	h
12	chanvre	10	cellulose	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
13	chanvre	10	cellulose	60	8.0	4.8	0.73	3.3	h
14	x	x	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
15	chanvre	10	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
16	chanvre	20	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
17	chanvre	30	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
18	chanvre	10	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
19	chanvre	10	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	v
20	chanvre	10	sable	50	8.0	4.8	0.73	3.3	h
21	chanvre	10	sable	50	4.5	4	0.60	3.3	h
22	chanvre	10	sable	50	12.0	5.5	0.83	3.3	h

Tableau 3 - Scénarios envisagés

Dans le tableau ci-dessus, nous pouvons voir les différents scénarios que nous envisageons d'étudier. Les 23 scénarios présentés ici sont à voir comme 19 cas différents puisque les scénarios 3, 15, 18 et 20 possèdent les mêmes configurations que le cas de base 0, servant seulement de repère au sein des regroupements.

La variation d'épaisseur de la couche d'inertie entre 20 et 60 cm a en fait été fixée par le logiciel TRNBuild. En effet, nous aurions voulu tester des configurations avec des épaisseurs plus importantes mais lorsque nous avons fait nos premiers essais en modifiant l'épaisseur de sable, le logiciel ne nous a pas permis de rentrer une couche plus grande que 60 cm en raison, semble-t'il, de problèmes de calcul par éléments finis. Nous avons donc choisi d'étudier quatre épaisseurs : 0 cm, 20 cm, 50 cm et 60 cm. Cependant, il est possible que ces scénarios envisagés ne puissent pas être étudiés dans leur intégralité pour les mêmes raisons.

III. Modélisation TRNSYS

Afin de modéliser notre système, nous avons choisi d'utiliser le logiciel TRNSYS. En effet, dans le but d'étudier un système de stockage, nous avons besoin d'un logiciel d'analyse thermique dynamique qui nous permettrait de suivre l'évolution du système heure par heure en fonction de la météo et de la demande énergétique. De plus, la partie TRNBuild nous a permis de modéliser l'habitation mais également de solutionner la problématique de notre modélisation de la couche « inertielle » enveloppant notre cuve.

III.1. Modélisation de l'habitation

III.1.1. Environnement général

La modélisation d'une habitation grâce à TRNBuild se fait à l'image d'une modélisation grâce au logiciel PEB.

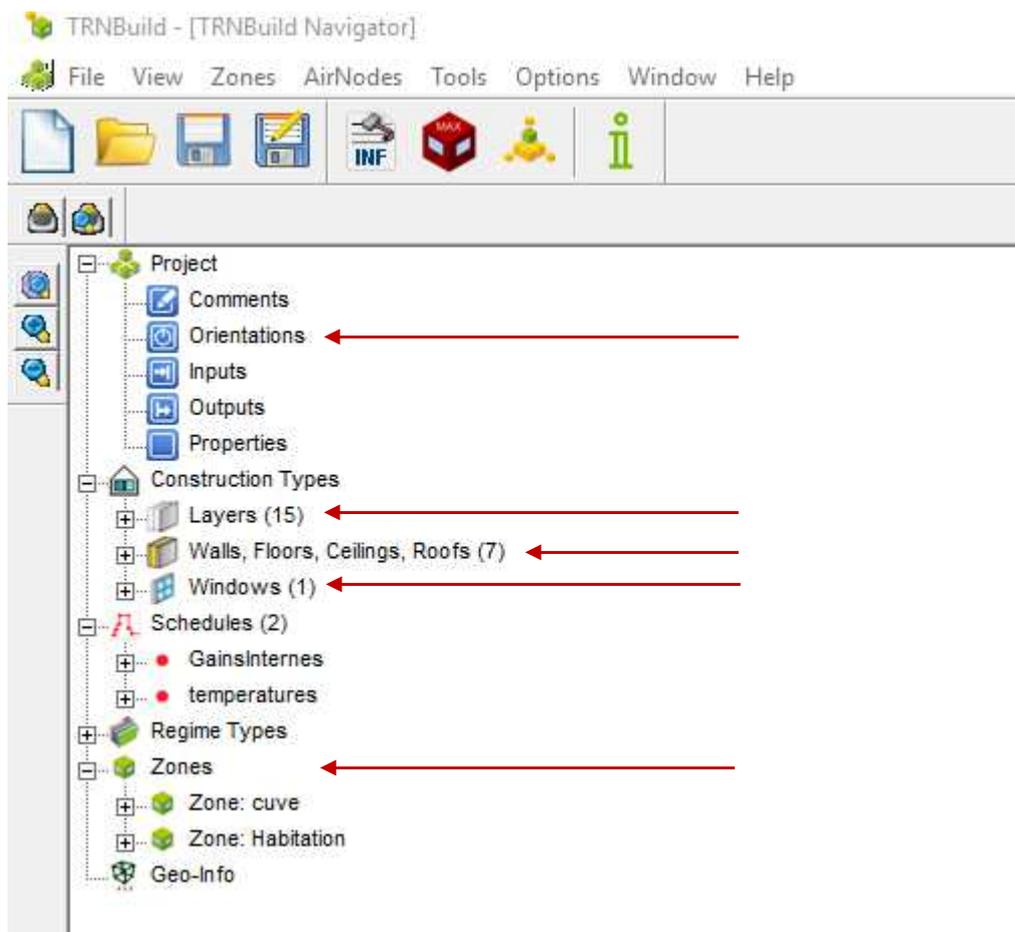


Figure 20 - Arborescence de TRNBuild

Ainsi, nous devons, dans un premier temps, définir les orientations de notre système. Une orientation comprend un azimut (angle par rapport au sud) ainsi qu'une inclinaison (angle par rapport à l'horizontale). La maison fil rouge comprends neuf orientations différentes. En effet, une maison parallélépipédique en comprendrait six (comme les six faces d'un dé). À ces six orientations, nous en ajoutons deux, car la maison fil rouge possède des murs en biais au sud-est et au nord-est. Enfin, comme il s'agit d'un toiture double pente, il faut également ajouter une fois de plus une orientation.

Nous nous retrouvons donc avec ces neuf orientations :

No	Orientation	Calculation	Used by Surface
1	S_0_90	-	7; 16;
2	W_90_90	-	9; 18;
3	N_180_90	-	8; 17;
4	E_270_90	-	10; 19;
5	H_0_0	-	-
6	S_0_30	-	13;
7	N_180_30	-	14;
8	E_225_90	-	11; 20;
9	S_315_90	-	12; 21;

Figure 21 - Orientations dans TRNBuild

III.1.2. Définition des couches

Une fois les orientations définies, nous définissons les « layers » qui sont les matériaux qui vont nous servir à fabriquer les parois que nous allons utiliser.

Il y a plusieurs types de layers, avec entre autres :

- Les « massive layer ». Dans cette catégorie, nous pouvons renseigner la masse volumique, la capacité thermique massique et le λ du matériau. Les massive layers permettent de traduire le comportement dynamique d'une couche en faisant apparaître la notion d'inertie ;
- Les « massless layer ». Ce layer ne nous permet pas de rentrer en détail les caractéristiques thermiques du matériaux. Dans ce layer, nous ne renseignons que la résistance thermique de la couche. Cela implique que nous ne pourrons pas faire varier l'épaisseur de la couche « massless » lors de la création de parois car la résistance thermique de la couche dépend de son épaisseur.

En réfléchissant à la manière dont nous allons définir les parois de l'habitation, nous nous rendons compte qu'il est nécessaire d'utiliser des massive layers afin de traduire l'inertie de la maison amenée par son enveloppe.

Pour les murs, nous sommes face à une ossature bois. Ainsi, il nous est impossible d'utiliser plusieurs massive layers superposées en vue de créer notre mur. Nous avons donc choisi de fabriquer un massive layer qui aurait les propriétés moyennes de notre mur ossature bois :

Selon le logiciel PEB, l'ossature bois est composée de 85% d'isolant et de 15% de bois de structure. Par la suite, nous avons calculé la masse volumique ainsi que la capacité thermique massique de notre couche au prorata de sa composition en bois et isolant. Pour le λ de notre couche, nous avons utilisé la valeur de U du mur que nous avons multiplié par son épaisseur ($\lambda=U*e$).

Layer Type Manager

layer type: 00-MurHab

Definition

Massive Layer Massless Layer Active Layer Chilled Ceiling

conductivity: 0.111 kJ / h m K

capacity: 1.685 kJ / kg K

density: 130.5 kg / m³

Embodied Energy (optional data, not required for thermal simulation)

total renewable primary energy: 0 MJ / kg

total non-renewable primary energy: 0 MJ / kg

Figure 22 - Création de massive layer pour les mur de l'habitation

Nous avons utilisé la même procédure pour la création du layer de toiture.

Pour le plancher, nous avons une structure par couches. Le plancher est constitué de 12 cm de béton armé sur lequel nous avons 8 cm de béton léger. Viennent à la suite les 10 cm d'isolant recouverts d'une chape de compression de 8 cm sur laquelle vient se placer la finition en terre cuite

de 1 cm. Finalement, nous avons renseigné chacun de ces matériaux en créant un massive layer à chaque fois.

III.1.3. Définition des parois

La création de parois, comme la superposition de plusieurs couches, se fait donc rapidement pour les parois de l'habitation. En effet, pour les murs et la toiture, la paroi sera composée d'une seule couche globale équivalente définie au préalable. Nous renseignons seulement l'épaisseur de la couche, ce qui nous reporte (de manière logique) au U correspondant à la paroi.

Construction Type Manager

construction type: MH

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	00-MurHab	0.220	massive

back

total thickness: 0.220 m

u - value: 0.137 W/m²K for reference only
(incl. h_i=7.7 W/m²K and h_o=25 W/m²K)

Solar Absorptance

front: 0.6

back: 0.6

Longwave Emission Coefficient

front: 0.9

back: 0.9

Note.
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

userdefined internal calculation

▶ 11 kJ/h m² K

back

userdefined internal calculation

▶ 64 kJ/h m² K

Figure 23 - Encodage d'une paroi - ici les murs de l'habitation (MH)

Pour le plancher, la méthode est similaire, mais nous « empilons » les matériaux créés afin d'obtenir la bonne composition de paroi.

Il faut, cependant, renseigner également (en plus de la composition de la parois) les coefficients de transfert par convection le long de la paroi. Ici, le « front » correspond à l'intérieur du bâtiment et le « back » à l'extérieur. Nous utiliserons les valeurs standard de 11 kJ/hm²K pour l'intérieur et 64 kJ/hm²K pour l'extérieur.

III.1.4. Définition des fenêtres

Window Type Manager

Window Type Manager

window type: WINDOW001

Glazing

ID number: 3200

slope of window: userdefined surface orientation

For 1 glazing module width: 0.77 m height: 1.08 m

u - value: 1.69 W/m²K

g - value: 0.66 %/100

ID spacer: 1 Aluminum - ASHREA Metallic

Optional Properties of Shading Devices

Additional Thermal Resistance

internal device: 0 h m² K/kJ

external device: 0 h m² K/kJ

Radiation depending shading control (internal model)

Close if total radiation on window > 648 kJ/h m²

Open if total radiation on window < 576 kJ/h m²

Daylight Properties (required if window is used in thermal zone with daylight sensor points)

Visible light transmittance: 0.8

Material name unshaded: undefined

Material name shaded: undefined

Reflection Coefficient of Internal Device

towards window: 0.5

towards zone: 0.5

Emissivity of Internal Device towards zone

0.9

Fraction of abs. Solar Radiation of Internal Device transformed to a conv. Heat Flow Rate (CCISHADE)

0.5 % / 100

Add as conv. gain to airnode: 1

Frame

window frame fraction: 0.15

c - value (1/R): 8.17 kJ/h m² K

solar absorptance: 0.6

emissivity: 0.9

Glazing + Frame

Front (inside) - Convective Heat Transfer Coefficient

userdefined internal calculation

11 kJ/h m² K

Back (outside) - Convective Heat Transfer Coefficient

userdefined internal calculation

64 kJ/h m² K

Embodied Energy (optional data, not required for thermal simulation)

total renewable primary energy: 0 MJ / m²

total non-renewable primary energy: 0 MJ / m²

Note: For the shaded configuration it is assumed that the blinds cover all glazing area without the need of modelling the device geometrical. A simplified approach for selecting a material for shaded state is to reduce the visual light transmittance of the unshaded glazing by a shading factor.

Figure 24 - Définition d'une fenêtre dans TRNBuild

Nous pouvons définir une fenêtre de manière très précise dans TRNBuild, mais nous n'avons pas les informations nécessaires pour créer une fenêtre personnalisée. Nous ne disposons que du U

(W/m²K) de celle-ci. Cependant, nous pouvons utiliser la bibliothèque intégrée à TRNBuild afin de sélectionner une fenêtre déjà créée, ayant le même coefficient U que notre consigne. Nous avons donc choisi une fenêtre ayant un U=0,79 (contre U=0.8 dans la version originale).

III.1.5. Définition des gains internes

Nous n'avons, ici, modélisé les gains interne liés aux occupants. En 2017 en Wallonie, un foyer moyen comprenait 2,3 personnes (Wallonie Iweps, 2018). Cependant, notre maison ne correspond pas à l'habitat moyen mais à la maison 4 façades moyenne. Nous avons donc considéré que quatre personnes habitaient cette maison.

Tout d'abord, nous définissons les gains internes générés par une seule personne. Nous avons utilisé la valeur de 70 W/h soit 252 kJ.

Gain/loss Type Manager

"Gain/loss Type" Manager

Gain/loss type name: GainHumain

Gain/loss Category

people

absolute gain/loss gain/loss related to reference floor area

Radiative

S: 151*GainsInternes kJ / h

Convective

S: 101*GainsInternes kJ / h

Electric Power Fraction

fraction of actual radiative + convective power

0 -

Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance.

Abs. Humidity

0 kg / hr

Figure 25 - définition des gains

Ces 252 kJ sont répartis de la manière suivante :

- 60% de manière radiative soit 151 kJ ;
- 40% de manière convective soit 101 kJ.

Ces gains unitaires sont ensuite multipliés par le nombre d'habitants présents dans l'habitation heure par heure. Pour cela, nous définissons un planning. Dans un premier temps, nous distinguons les jours de la semaine, où nous supposons que les parents travaillent et que les enfants sont scolarisés, des jours de week-end, où les occupants sont à la maison. Par conséquent, nous obtenons deux profils types :

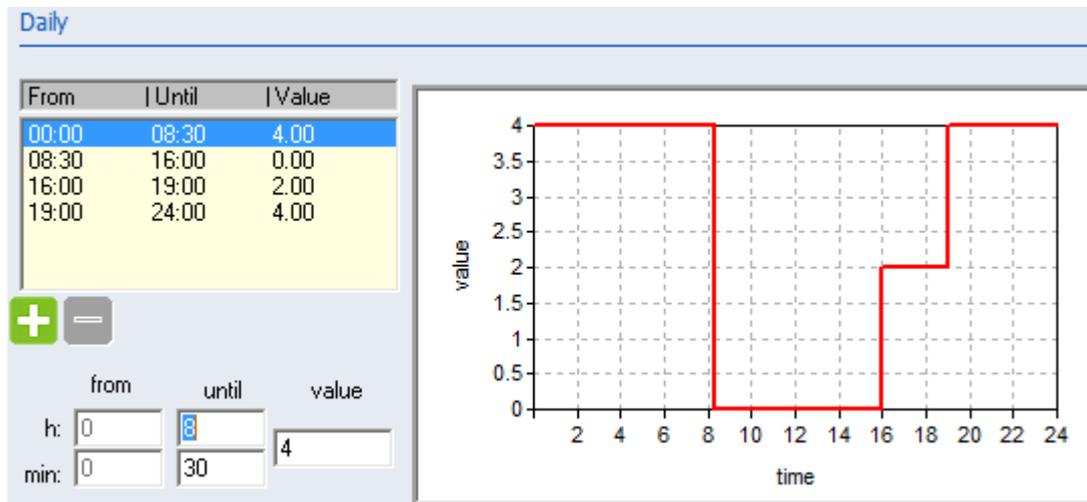


Figure 27 - Profil d'occupation de jour de semaine

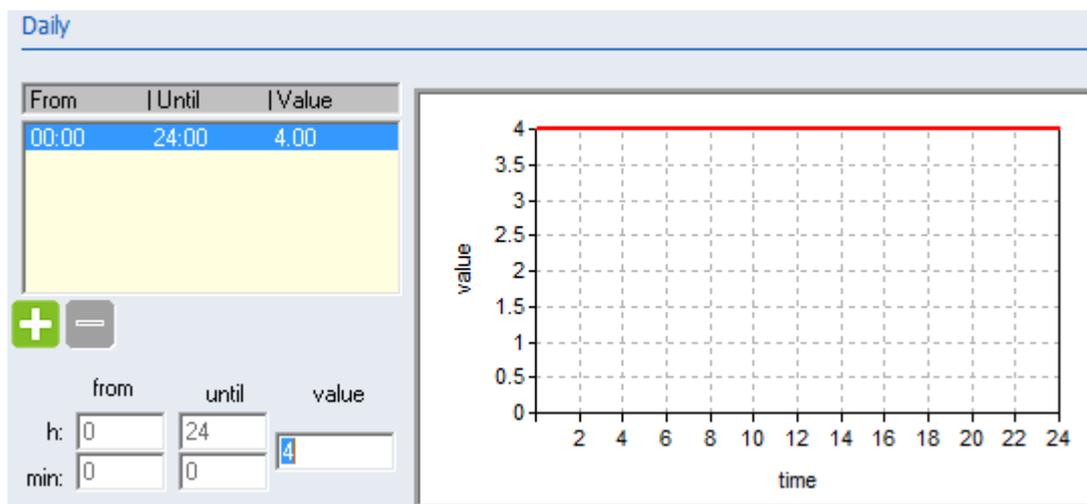


Figure 26 - Profil d'occupation de week-end

Nous utilisons ensuite ces deux profils journaliers pour créer un profil hebdomadaire :

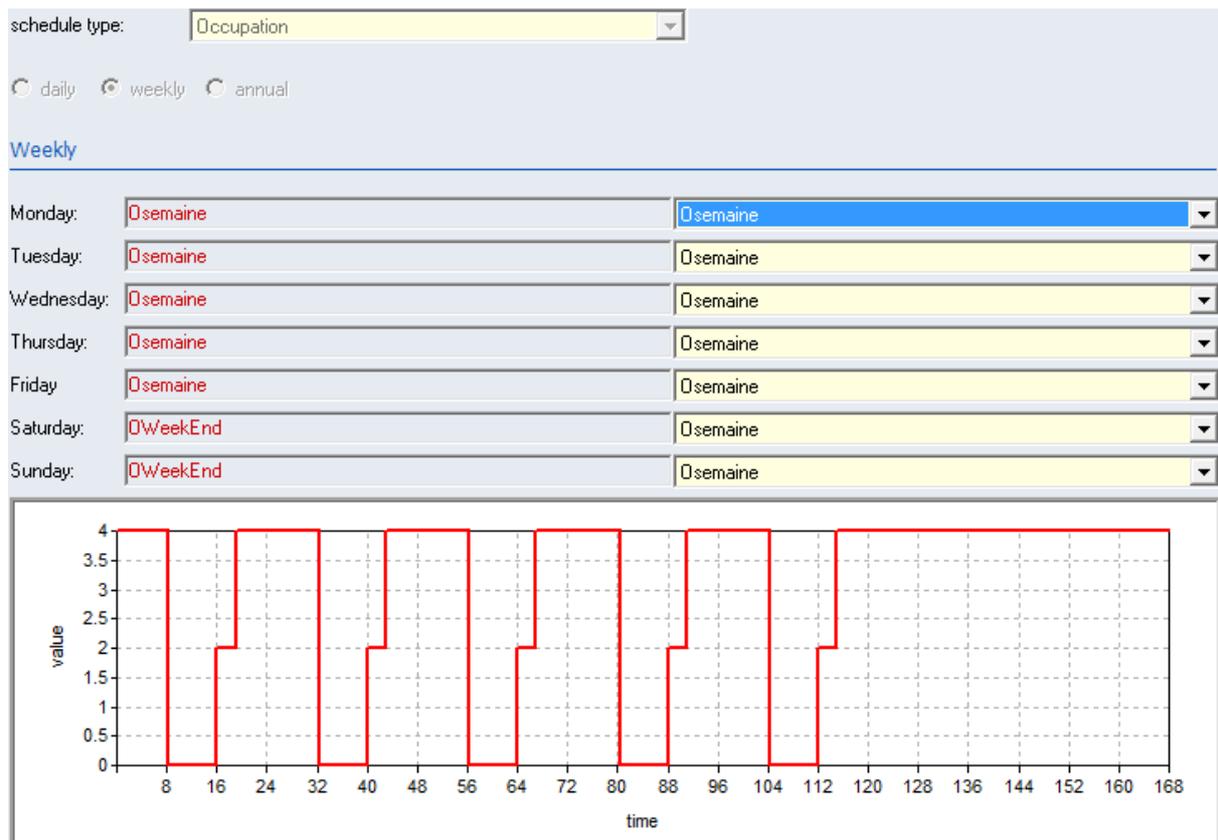


Figure 28 - Profil d'occupation hebdomadaire

Il suffit ensuite d'appliquer ce planning aux gains unitaires.

III.1.6. Définition du chauffage de l'habitation

Pour notre modèle, nous avons choisi d'utiliser un chauffage par le sol fonctionnant à 75% de manière rayonnante. Cependant, le choix du type de chauffage n'aura que très peu d'impact sur le reste de la simulation.

Nous voulions, dans un premier temps, générer une température de consigne pour notre chauffage qui évolue en fonction de la journée. En effet, la température de confort n'est pas la même le jour et la nuit. De plus, le chauffage est utile seulement durant les périodes d'occupation de l'habitation. Nous créons donc, une fois de plus, deux plannings journaliers : un pour les jours de la semaine et un pour le week-end, en se basant à la fois sur le planning d'occupation de la maison, défini auparavant, ainsi que sur la température de confort, différente entre la nuit et le jour. Nous avons donc créé les plannings suivants :

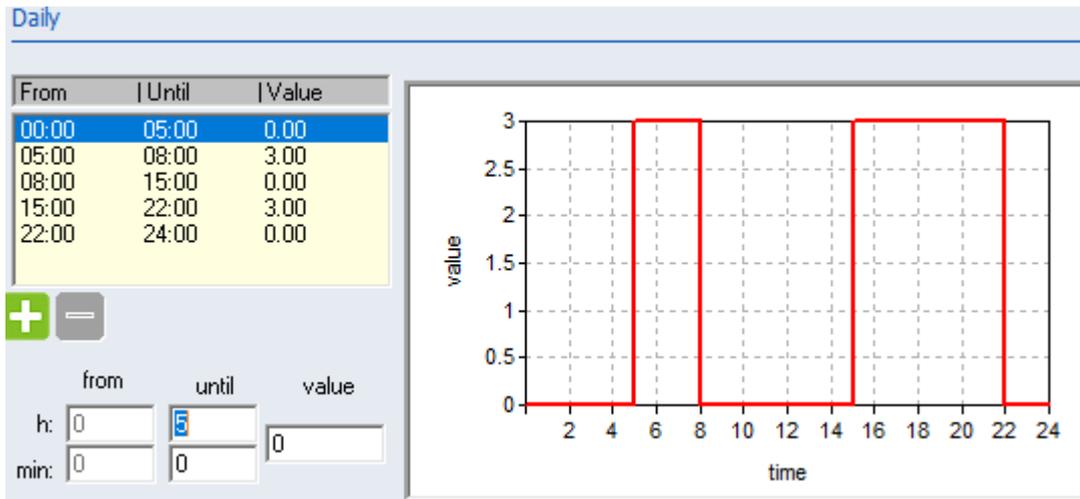


Figure 29 - Planning de température de semaine

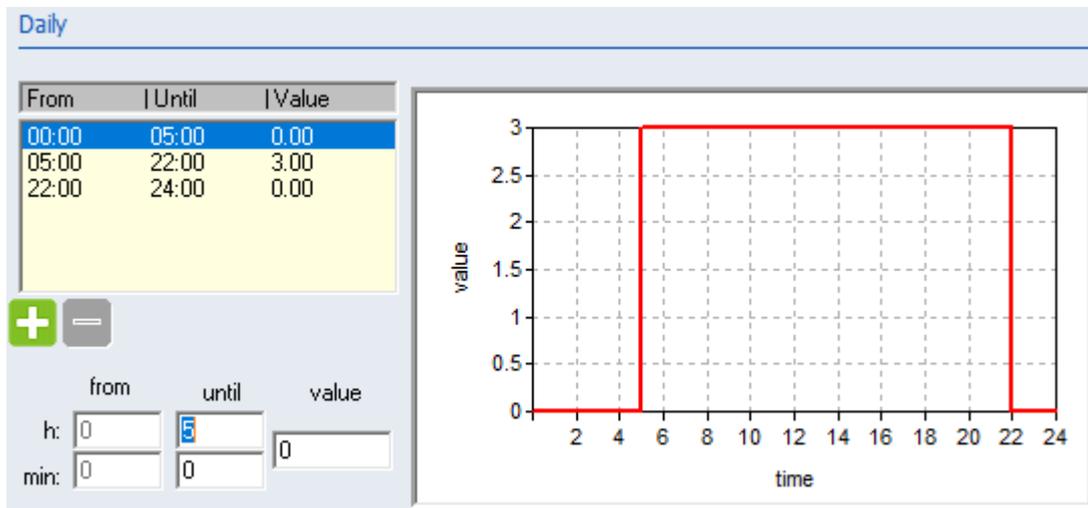


Figure 30 - Planning de température de week-end

Nous avons ensuite regroupé ces deux plannings pour former un planning hebdomadaire :

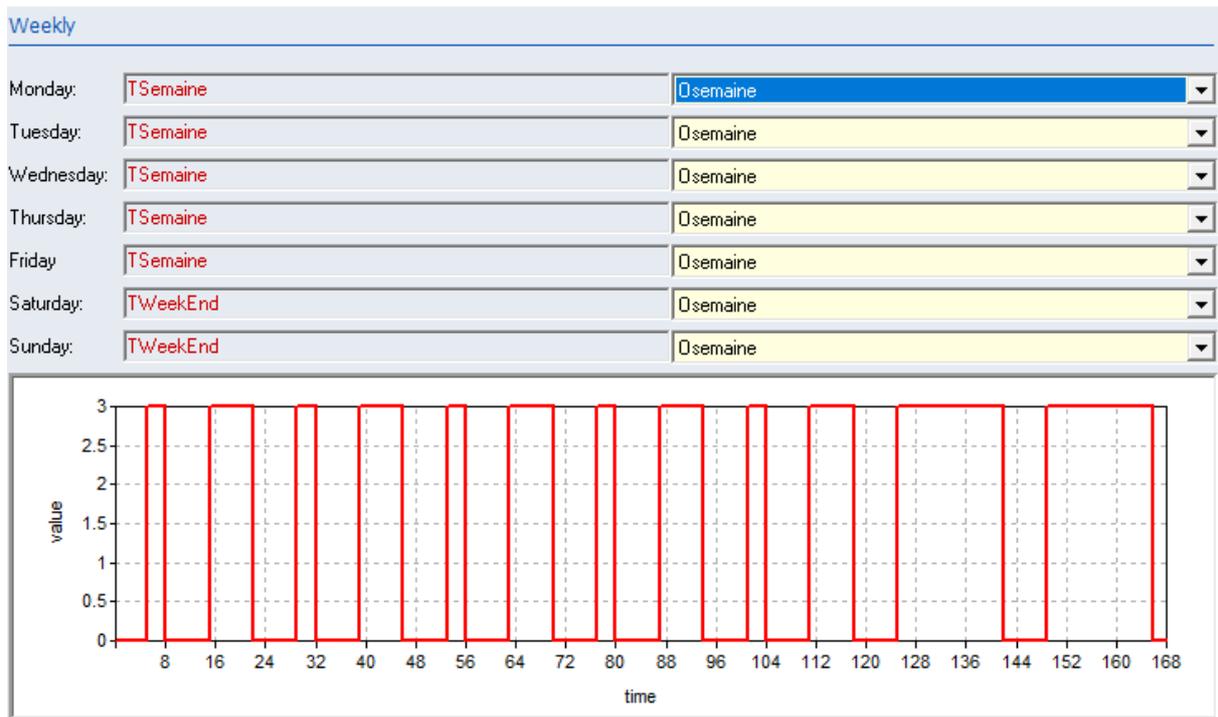


Figure 31 - Planning de chauffage hebdomadaire

III.1.7. Définition de la ventilation et de l'étanchéité à l'air

Pour l'étanchéité à l'air, nous avons utilisé les données de l'étude pour la commune de Villers-le-Bouillet des cas 8, 9 et 10. Il nous est donné un taux d'étanchéité à l'air de $4\text{m}^3/\text{hm}^2$ à 50 Pa. Soit $0,16\text{m}^3/\text{hm}^2$ à 2Pa. Ce qui nous donne $28,48\text{m}^3/\text{h}$ pour les 178m^2 de la maison fil rouge. Soit $0,05\text{ l/h}$ pour les 551m^3 de la maison.

Pour la ventilation, selon la norme NBN d50-001, un renouvellement de $3,6\text{m}^3/\text{hm}^2$ est recommandé, nous avons par conséquent utilisé cette valeur. Nous avons toutefois veillé à encoder la récupération de chaleur du système de ventilation.

III.1.8. Définition de la zone habitation

Pour définir une zone, il faut tout d'abord **(1)** indiquer son volume, sa surface de plancher chauffé, et sa « capacitance ». La « capacitance » est un paramètre qui traduit l'inertie générale de la maison provenant du mobilier. N'ayant pas de valeur précise à renseigner, nous avons choisis d'utiliser la valeur standard de $\text{capacitance}=5*\text{volume}$. Pour ce qui est du volume et de la surface de plancher chauffé, nous avons utilisé les valeurs de la maison fil rouge.

Nous devons ensuite (2) encoder l'enveloppe. Pour cela, nous sélectionnons les parois créées auparavant et rentrons leurs surface et orientation. Nous définissons également leur condition aux limites en indiquant si ce sont des parois intérieures, extérieures ou « boundary », qui correspond à une paroi en contact avec le sol par exemple. Dans notre cas, toutes nos parois sont des parois extérieures, même le plancher, car la maison est située au-dessus d'un vide ventilé.

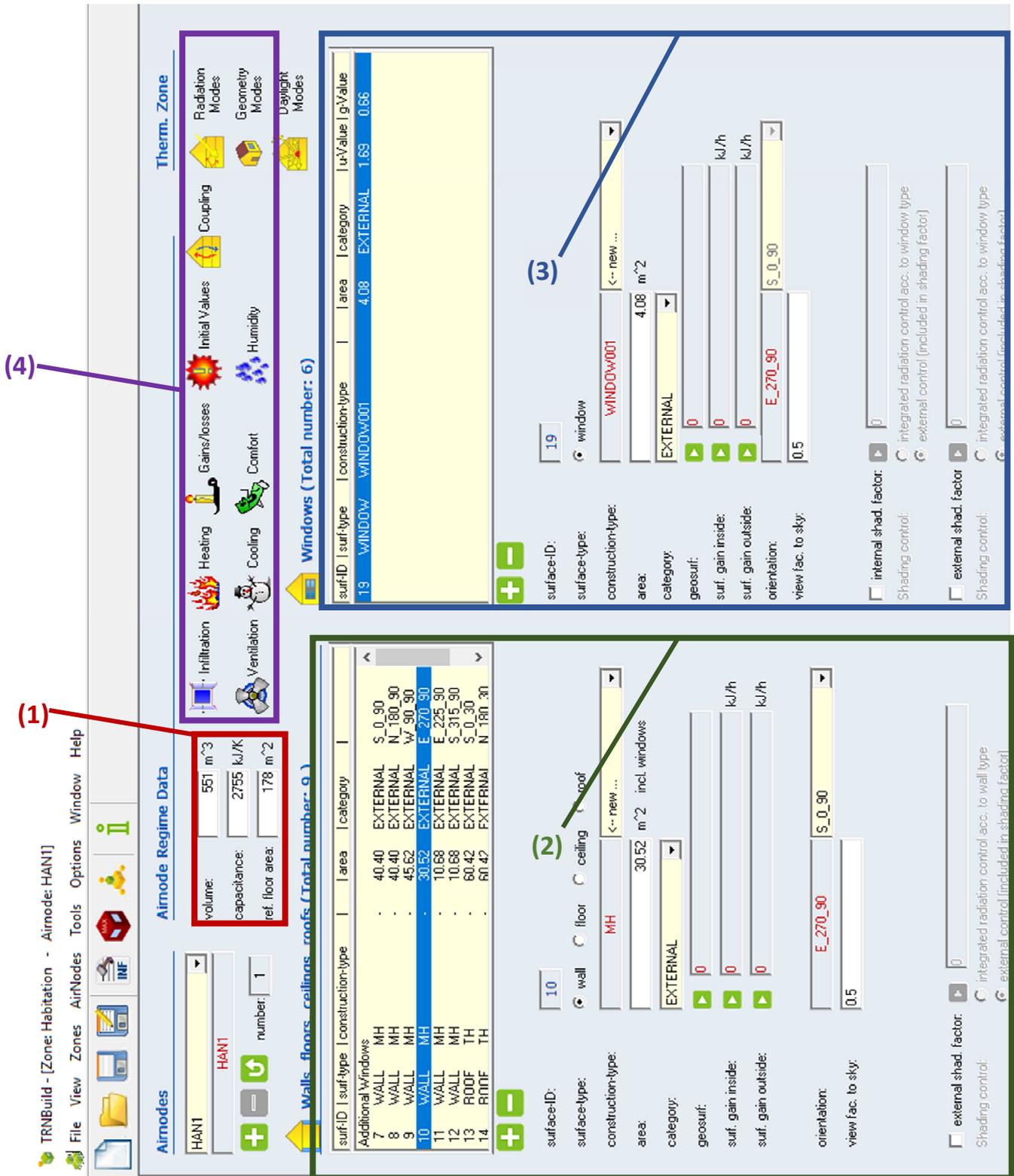


Figure 32 - Fenêtre d'encodage d'une zone

Nous venons ensuite **(3)** ajouter des fenêtres à ces murs. Les fenêtres sont réparties de la sorte :

- 9,52m² au Sud ;
- 4,08m² à l'Est, au Sud-Est et au Nord-Est ;
- 6,12m² au Nord et à l'Ouest.

Nous sélectionnons les murs avec l'orientation souhaitée et y appliquons la bonne surface de fenêtre (en utilisant la fenêtre choisie auparavant dans la bibliothèque).

Pour finir, **(4)** il faut appliquer les gains internes, le chauffage, la ventilation et l'étanchéité à l'air que nous avons défini au préalable.

III.2. Modélisation du système de stockage

Le logiciel TRNSYS contient beaucoup de types (modèles) simulant un stockage de chaleur dans une cuve d'eau. Selon les modèles, nous pouvons faire varier l'orientation (horizontale ou verticale), le nombre d'entrées et de sorties, le degré de stratification, la position des entrées et sorties, l'isolation de la cuve, etc.

Cependant, aucun type de la bibliothèque ne permet d'intégrer la notion d'inertie pour l'enveloppe de la cuve. Or, il s'agit non seulement d'un des paramètres que l'on souhaite étudier, mais surtout de la spécificité du système de base considéré.

Nous avons alors modélisé notre cuve en deux parties :

- La cuve d'eau en elle-même ;
- L'enveloppe de notre cuve (constituée de notre matériau à inertie et de notre isolant).

III.2.1. Modélisation de la cuve

Pour la cuve, nous avons choisi d'utiliser le type158. Ce type nous permet d'avoir deux entrées et deux sorties, ce qui correspond mieux au système général envisagé. Ainsi, les entrées et sorties 1 seront utilisées pour la boucle de stockage en relation avec les collecteurs, tandis que les entrées et sorties 2 seront utilisées pour la boucle de décharge en relation avec l'habitation.

Le type 58 est annoncé comme une cuve verticale, cependant nous pouvons préciser que nous ne voulons pas de stratification ce qui nous permet de la considérer comme horizontale. L'avantage consiste à pouvoir simuler la verticalité et l'horizontalité de la cuve grâce à un seul type de fenêtre, afin d'avoir des résultats cohérents.

(total2.tpf) Cuve

Parameter	Input	Output	Derivative	Comment
Name	Value	Unit	More	Macro
1 Tank volume	8	m ³	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2 Tank height	4.8	m	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3 Number of tank nodes	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4 Top loss coefficient	10.9	kJ/hr.m ² .K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5 Edge loss coefficient	10.9	kJ/hr.m ² .K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6 Bottom loss coefficient	10.9	kJ/hr.m ² .K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
7 Fluid specific heat	4.198	kJ/kg.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
8 Fluid density	992.	kg/m ³	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Figure 33 - Encodage de la cuve d'eau

Dans les paramètres de la cuve d'eau nous fixons :

- Les dimensions de la cuve (volume et hauteur) ;
- Le degré de stratification thermique (1 pour pas de stratification) ;
- Les coefficients de perte thermique des parois de la cuve. Ici, nous avons calculé ces pertes en fonction de l'épaisseur de la cuve (donnée constructeur) et du λ de l'acier galvanisé ;
- Les propriétés thermiques du fluide. Dans notre cas, le matériau de stockage est de l'eau ;
- La position (relativement à la hauteur) des entrées et sorties.

III.2.2. Modélisation de l'enveloppe

Afin de simuler l'enveloppe de la cuve, nous sommes à nouveau passés par TRNBuild et avons modélisé cette enveloppe comme un bâtiment venant englober notre cuve. Ainsi, la cuve fournira de l'énergie aux murs sous forme d'un gain qui va faire monter en température la face intérieure des mur (le sable). En échange, nous pourrons fixer la température extérieure de la cuve comme étant la température intérieure de surface des parois de l'enveloppe.

Dans TRNBuild nous définissons de nouveaux « layers », mais cette fois nous utilisons des « massive layer ». Nous pouvons alors entrer les propriétés thermiques de nos matériaux. Nous encodons, ainsi, tous les matériaux dont nous aurons besoin (béton maigre, béton armé, brique, cellulose, etc.).

Layer Type Manager

"Layer Type" Manager [✓] [✕]

layer type:

Definition

Massive Layer Massless Layer Active Layer Chilled Ceiling

conductivity: kJ / h m K

capacity: kJ / kg K

density: kg / m³

Embodied Energy (optional data, not required for thermal simulation)

total renewable primary energy: MJ / kg

total non-renewable primary energy: MJ / kg

Figure 34 - Encodage d'un "massive layer"

"Construction Type" Manager [✓] [✕]

construction type:

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	betonname	0.080	massive
2	Chanvre	0.151	massive
3	Sable	0.500	massive

back

total thickness: m

u - value: W/m² K for reference only
(incl. h_i=7.7 W/m² K and h_o=25 W/m² K)

Solar Absorptance

front: -

back: -

Longwave Emission Coefficient

front: -

back: -

Note.
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

userdefined internal calculation

kJ/h m² K

back

userdefined internal calculation

kJ/h m² K

Figure 35 - Encodage des murs

Nous constituons, ensuite, un mur en superposant les layer préalablement créés. Les épaisseurs de couches sont fixées en fonction de notre cas de base (8cm de béton, 10cm d'isolant, 50cm+ de sable). Pour le sable, nous prenons la valeur de 50 cm car il s'agit de l'épaisseur minimum que l'on peut rencontrer. Pour nos simulations, nous viendrons dans cette fenêtre faire varier les épaisseurs et les matériaux. Ici, comme la surface extérieure de mur sera en contact avec le sol, nous fixons son coefficient d'échange convectif à 0.

Nous créons ensuite, de la même manière que nous avons créé la zone habitation, une zone cuve. Son encodage est, en revanche, bien plus simple puisque tous les murs sont des « boundary » et qu'il n'y a pas de fenêtre. Nous fixons 10°C comme température extérieure aux murs. Cette valeur ne reflète pas exactement la réalité de l'évolution de la température en fonction de la profondeur du sol, mais permet une approximation acceptable dans le cas de notre dimensionnement global. Dans le cas des mur « boundary », nous pouvons choisir de définir les gains internes comme un « input ». C'est grâce à cela que nous allons pouvoir mettre en relation notre zone avec notre type158 de cuve. Nous définissons alors des « GainsParois », « GainsHaut » et « GainsBas » qui seront reliés aux déperditions de la cuve.

Le volume de cette zone est, cependant, fixé au minimum (0.1m³) afin de simuler au mieux un contact entre la zone et la cuve.

III.2.3. Relation cuve/zone

Il s'agit maintenant de relier la cuve et la zone comme prévue.

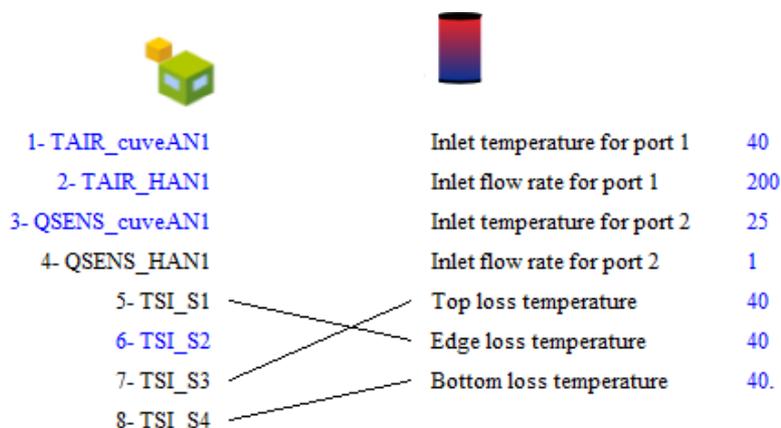


Figure 36 - Relation de la zone vers la cuve

Nous relierons, ici, la température intérieure de la zone aux températures de surface de la cuve.

Average tank temperature	5- AZEN	0
Energy delivered via port 1	6- AAZM	0
Energy delivered via port 2	7- IT_S_0_90	0
Top losses	8- IT_W_90_90	0
Edge Losses	9- IT_N_180_90	0
Bottom losses	10- IT_E_270_90	0
Auxiliary heating rate	11- IT_H_0_0	0
Tank energy storage rate	12- IT_S_0_30	0
Tank energy balance error	13- IT_N_180_30	0
Temperature at thermostat	14- IT_E_225_90	0
Tank nodal temperature	15- IT_S_315_90	0
	16- IB_S_0_90	0
	17- IB_W_90_90	0
	18- IB_N_180_90	0
	19- IB_E_270_90	0
	20- IB_H_0_0	0
	21- IB_S_0_30	0
	22- IB_N_180_30	0
	23- IB_E_225_90	0
	24- IB_S_315_90	0
	25- AI_S_0_90	0
	26- AI_W_90_90	0
	27- AI_N_180_90	0
	28- AI_E_270_90	0
	29- AI_H_0_0	0
	30- AI_S_0_30	0
	31- AI_N_180_30	0
	32- AI_E_225_90	0
	33- AI_S_315_90	0
	34- GRDREF	0
	35- gainParois	0
	36- Tsol	10
	37- GainBas	0
	38- GainHaut	0

Nous définissons ici les pertes de la cuve comme gains internes pour les parois de la cuve.

Figure 37 - relation de la cuve vers la zone

III.3. Modélisation du système général

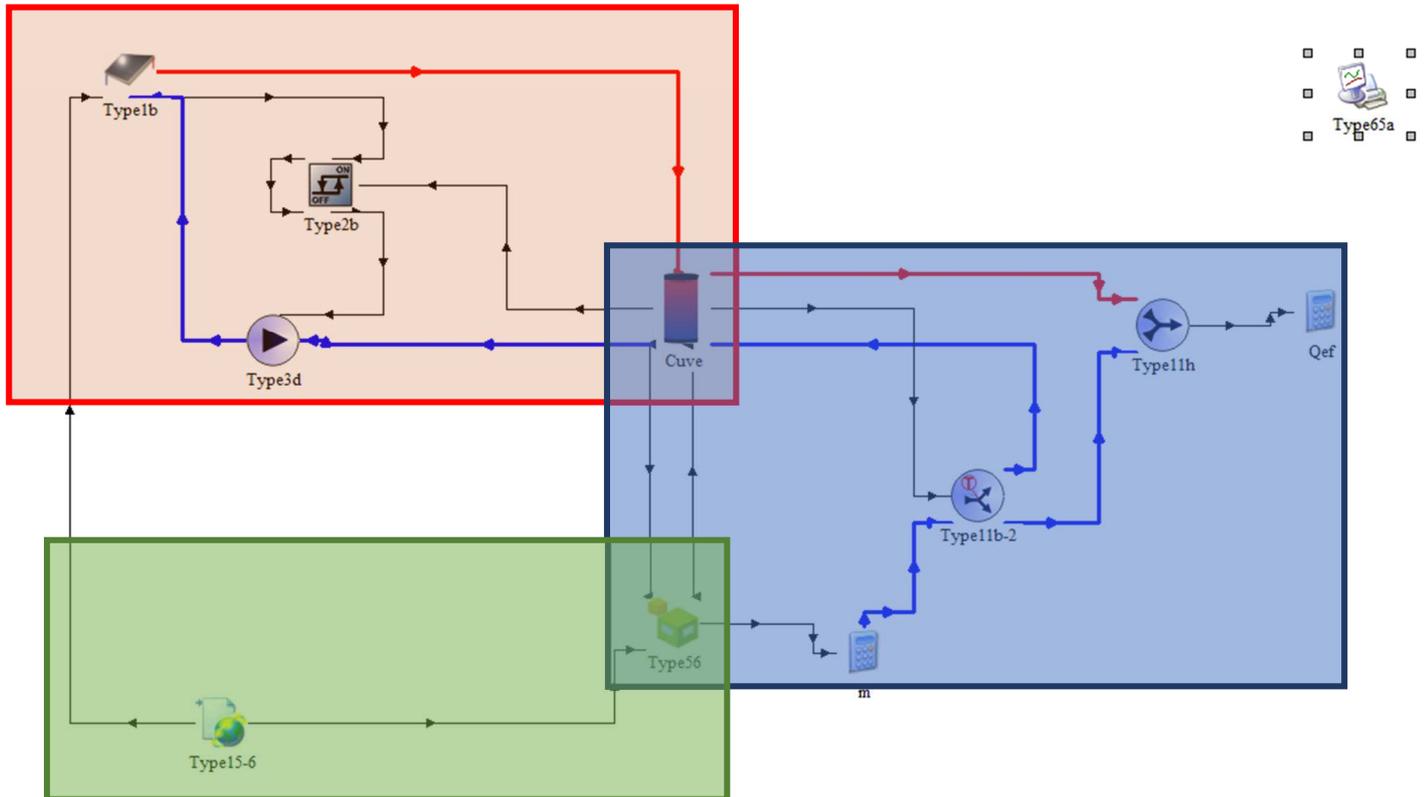


Figure 38 - système général TRNSYS

Dans le système général, nous pouvons distinguer trois sous-systèmes :

- Le système « Météo-Habitation » qui va nous fournir la demande en énergie ;
- Le système « Collecteurs-Stockage » qui correspond à la boucle de charge ;
- Le système « Stockage-Demande » qui correspond à la boucle de décharge et qui va nous donner l'énergie fournie par notre système de stockage.

III.3.1. Le système Météo-Habitation

Le système météo habitation est un système très simple qui comprend seulement un type56, dans lequel nous avons auparavant modélisé notre habitation, et un type15-6 qui correspond au fichier météo. Pour le fichier météo, nous avons utilisé le fichier météonorm de la station météo d'Uccle.

Les connections entre les deux types sont assez standard, elles permettent au type56 d'habitation de générer un besoin en chauffage (grâce à la consigne en chauffage définie lors de la modélisation TRNBuild) en fonction des conditions climatiques. Nous avons deux types de calcul qui vont s'opérer :

- Des calculs internes. Ces calculs permettent au type56 de faire un bilan thermique entre l'ambiance de l'habitation et l'ambiance extérieure. Ainsi, nous devons ici renseigner la température extérieure, l'humidité relative extérieure et la « effective sky température » ;
- Des calculs externes. Ces calculs vont définir les apports solaires sur l'enveloppe. Pour cela, nous devons renseigner pour chaque orientation le rayonnement total, le rayonnement direct et l'angle d'incidence sur la surface.

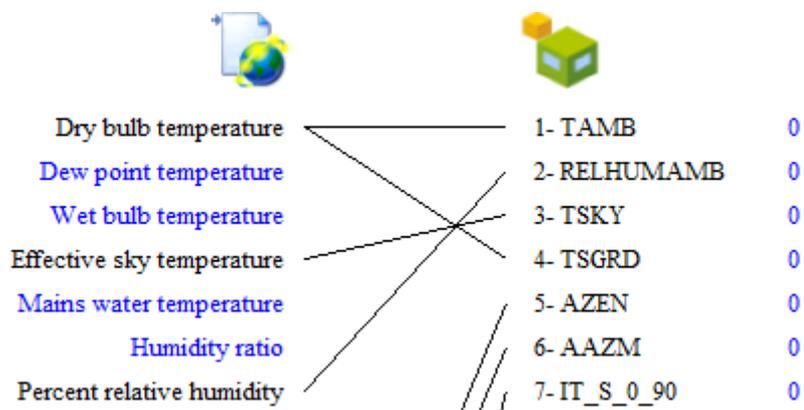


Figure 39 – Relation « fichier météo – zone d'habitation »

Une fois toutes ces connections réalisées, nous pouvons obtenir, directement en output du type56, les besoins en énergie heure par heure Q.

III.3.2. La boucle de charge

Le fonctionnement de base de la boucle de charge est garanti par la relation entre le collecteur (ici des capteurs solaires thermiques simples de type 1b) et la cuve de stockage. L'eau est chauffée dans les capteurs solaires puis envoyée dans la cuve de stockage. La température de sortie des capteurs définit alors la température d'entrée 1 de la cuve. De même, les deux débits sont liés.

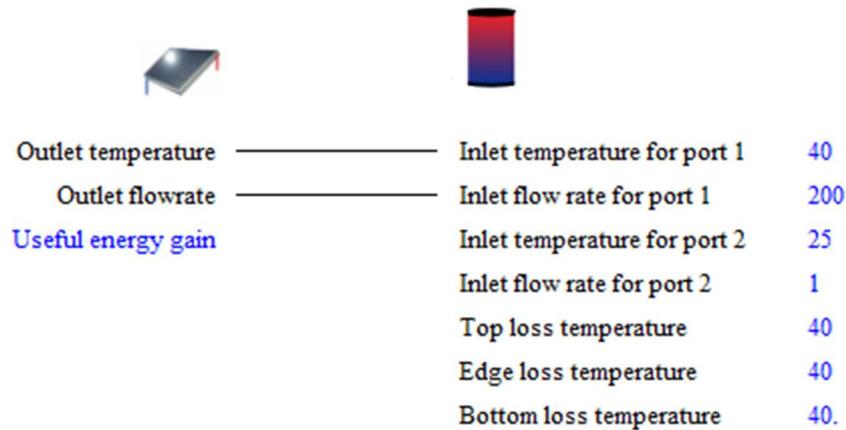


Figure 40 - Relations "collecteurs-cuve"

À ce système simple, nous ajoutons une pompe de type 3d afin de forcer la circulation du fluide caloporteur. L'eau sort donc de la cuve par la sortie 1, passe dans la pompe ; elle est renvoyée ensuite au collecteur pour être réchauffée.

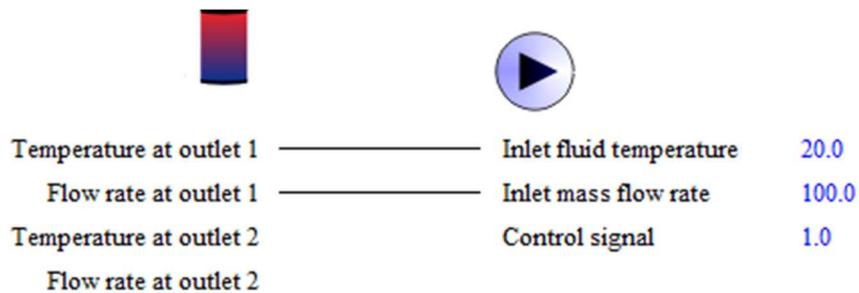


Figure 42 - Relations "Cuve-Pompe"

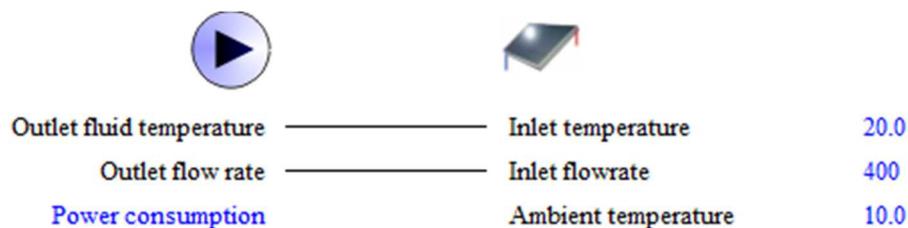


Figure 41 - Relations "Pompe-Collecteur"

Afin d'optimiser le système, nous ajoutons également un régulateur afin de régir le fonctionnement de la pompe. Celui-ci est régi par une hystérésis. L'hystérésis dépend des

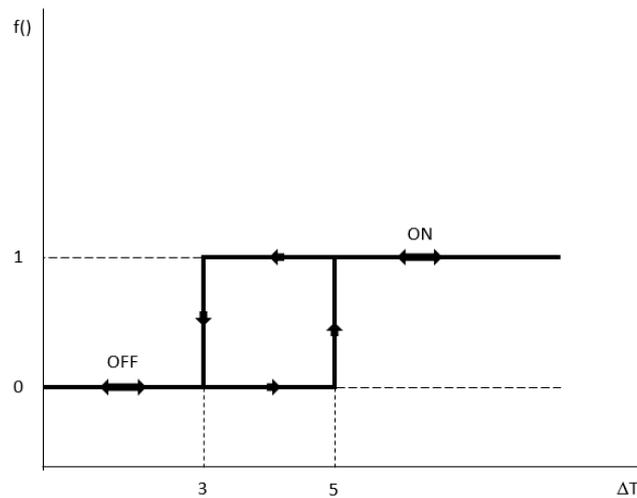


Figure 47 - Hystérésis du régulateur

températures d'entrée de la cuve (sortie du collecteur) et de sortie de la cuve (entrée du collecteur). Ce système permet de couper la boucle de charge une fois le système de stockage complètement chargé. Ainsi, lors de la charge, lorsque l'écart de température entre l'entrée et la sortie de la cuve est inférieur à 3°C, le régulateur coupe la pompe mettant fin au stockage. Cependant, dès que l'écart de température repasse au-dessus des 5°C, la pompe se remet en marche, reprenant ainsi la charge du système. La différence entre la température de marche et la température d'arrêt permet au système d'éviter de faire des « on/off » successifs lorsque l'écart de température oscille autour des 3°C.

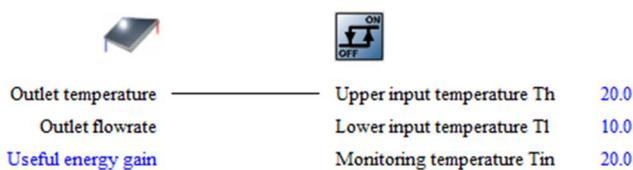


Figure 46 - Relation "collecteur-régulateur"

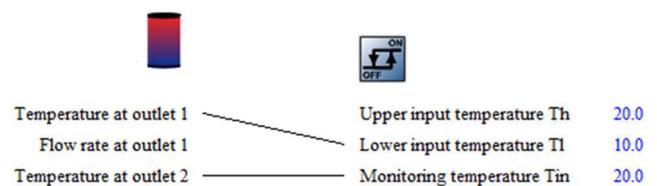


Figure 45 - Relation "Cuve-Régulateur"

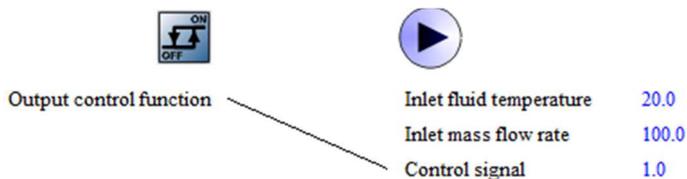


Figure 43 - Relation "Régulateur-Pompe"

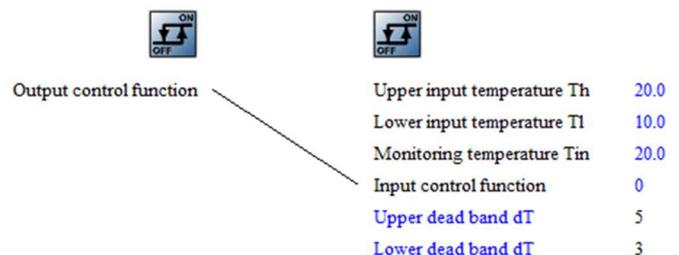


Figure 44 - Relation "Régulateur-Régulateur"

III.3.3. La boucle de décharge

Le principe de la boucle de décharge consiste à envoyer l'eau chaude de la cuve afin de chauffer l'habitation. Toutefois, nous ne pouvons pas envoyer une eau à une température non contrôlée dans le système de chauffage de l'habitation. Dans le cas inverse, la cuve se déchargerait trop rapidement et le confort de l'habitation ne serait pas assuré.

Nous avons choisi, ici, d'utiliser un plancher chauffant comme système de chauffage pour l'habitation. Nous définissons ce plancher comme ayant une température d'entrée de 35°C et une température de sortie de 25°C.

La température de retour de la cuve (entrée 2) sera donc fixée à 25°C.

Il faut ensuite contrôler la température que l'on injecte dans le système. Pour cela, nous mettons en place un système de vanne trois voies. Le but consiste ici à se servir de l'eau de retour pour mitiger la température de sortie de la cuve. Le principe se définit de la manière suivante :

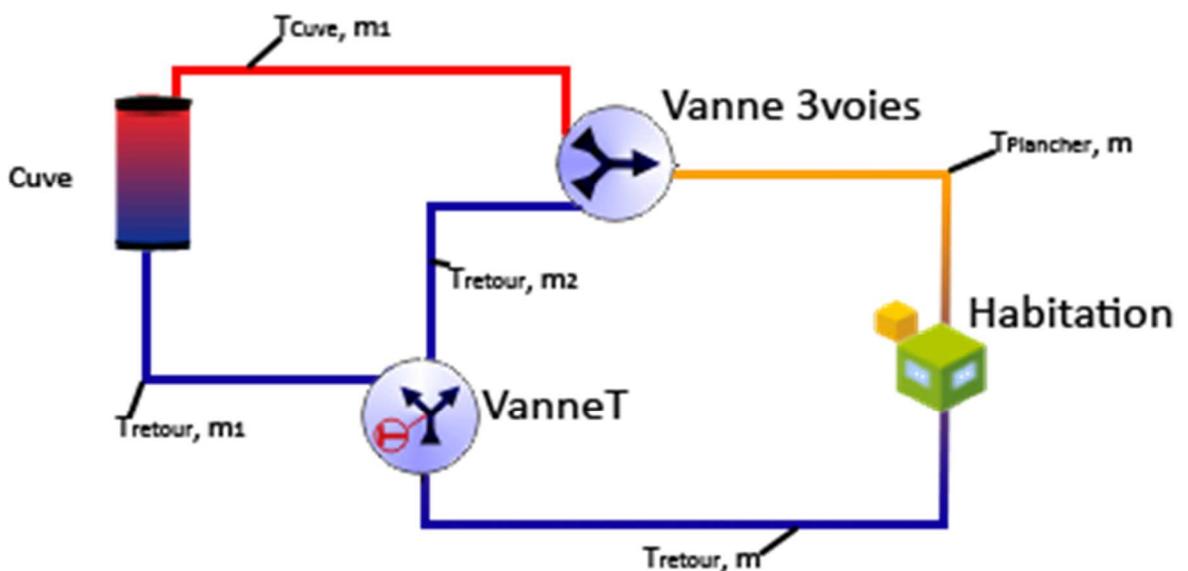


Figure 48 - Schéma de principe de la boucle de décharge

Le débit m est imposé par la demande de l'habitation, il est calculé par la formule :

$$m = \frac{Q}{C_p \times \Delta T} \quad (4)$$

Avec :

- Q : la demande en énergie de l'habitation ;
- Cp : la capacité thermique volumique de l'eau ;
- ΔT : la différence de température entre l'entrée du plancher chauffant et la sortie, ici 10°C.

Nous entrons donc cette équation dans TRNSYS afin d'obtenir le profil de débit heure par heure.

La température de retour T_{retout} et la température d'entrée du plancher chauffant $T_{plancher}$ sont fixées respectivement à 35°C et 25°C.

Dans TRNSYS, une vanne 3 voies de type 11h, comme nous avons utilisé (ici appelée vanne 3voies), ne permet pas de faire un mélange afin d'obtenir une température finale. Il faut alors la coupler à une vanne de type 11b (ici appelé VanneT). Nous indiquons à la vanneT la température de la cuve et la température que vous souhaitez obtenir après mélange. Notre vanneT va donc recevoir l'eau à la température de retour avec le débit m et va séparer ce flux en deux, créant alors une première sortie qui aura un débit m_1 et une seconde au débit m_2 . La vanneT calcule les débits m_1 et m_2 de sorte que :

$$m_1 + m_2 = m \quad (5)$$

et

$$m_1 \times T_{cuve} + m_2 \times T_{retour} = m \times T_{plancher} \quad (6)$$

Le mélange de la seconde équation est ensuite réalisé par la vanne 3voies. Cependant, ce mélange n'atteint pas la température de 35°C lorsque la cuve est en dessous de cette température.

III.4. Extraction des données

Afin de sortir nos résultats de TRNSYS, nous utilisons un traceur de type 65a. Les données que nous pouvons directement sortir de notre modèle sont :

- Le profil de demande heure par heure ;
- La température de sortie de la cuve ;
- La température moyenne de la cuve. Dans le cas d'une cuve horizontale (sans stratification), la température moyenne sera la même que la température de sortie.

Afin d'évaluer les performances de notre système, nous souhaiterons également sortir l'énergie fournie par notre système (que nous appellerons Q_{ef}) et la mettre en relation avec la demande de l'habitation.

Pour cela nous rentrons dans TRNSYS l'équation suivante :

$$Q_{ef} = m \times (T_{plancher} - T_{retour}) \times C_p \quad (7)$$

Nous pouvons donc constater que lorsque la cuve sera au-dessus de 35°C, nous aurons $Q_{ef}=Q$. En comparant Q et Q_{ef} nous aurons donc le pourcentage de la demande que pourrait assurer notre système.

IV. Résultats

Parmi les 19 scénarios différents annoncés dans le chapitre II.2, deux ont dû être abandonnés car ne pouvant pas être encodés dans TRNBuild. Un troisième a dû être modifié. Nous étudierons donc les scénarios suivants :

Scénario	Isolant	e (cm)	Inertie	e (cm)	Volume (m3)	hauteur (m)	rayon (m)	ration h/d	position
0	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
1	chanvre	10	x	x	8,0	4,8	0,73	3,3	h
2	chanvre	10	sable	20	8,0	4,8	0,73	3,3	h
3	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
4	chanvre	10	sable	60	8,0	4,8	0,73	3,3	h
5	chanvre	10	béton	20	8,0	4,8	0,73	3,3	h
6	chanvre	10	béton	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
7	chanvre	10	béton	60	8,0	4,8	0,73	3,3	h
8	chanvre	10	brique	20	8,0	4,8	0,73	3,3	h
9	chanvre	10	brique	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
10	chanvre	10	cellulose	20	8,0	4,8	0,73	3,3	h
11	chanvre	10	cellulose	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
12	x	x	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
13	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
14	chanvre	20	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
15	chanvre	15	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
16	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
17	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	v
18	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
19	chanvre	10	sable	50	12	5,5	0,83	3,3	h
20	chanvre	10	sable	50	4,5	4	0,60	3,3	h

Tableau 4 - Scénarios étudiés

Nous ne pourrions pas étudier les configurations avec 60 cm de cellulose ou de brique pleine. De même, pour les épaisseurs d'isolant, la valeur la plus haute de 30 cm a dû être changée en une valeur intermédiaire de 15 cm.

IV.1. Cas de base

IV.1.1. Performances

Après encodage de notre cas de base et extraction des données TRNSYS dans Excel, nous pouvons présenter le graphique suivant :

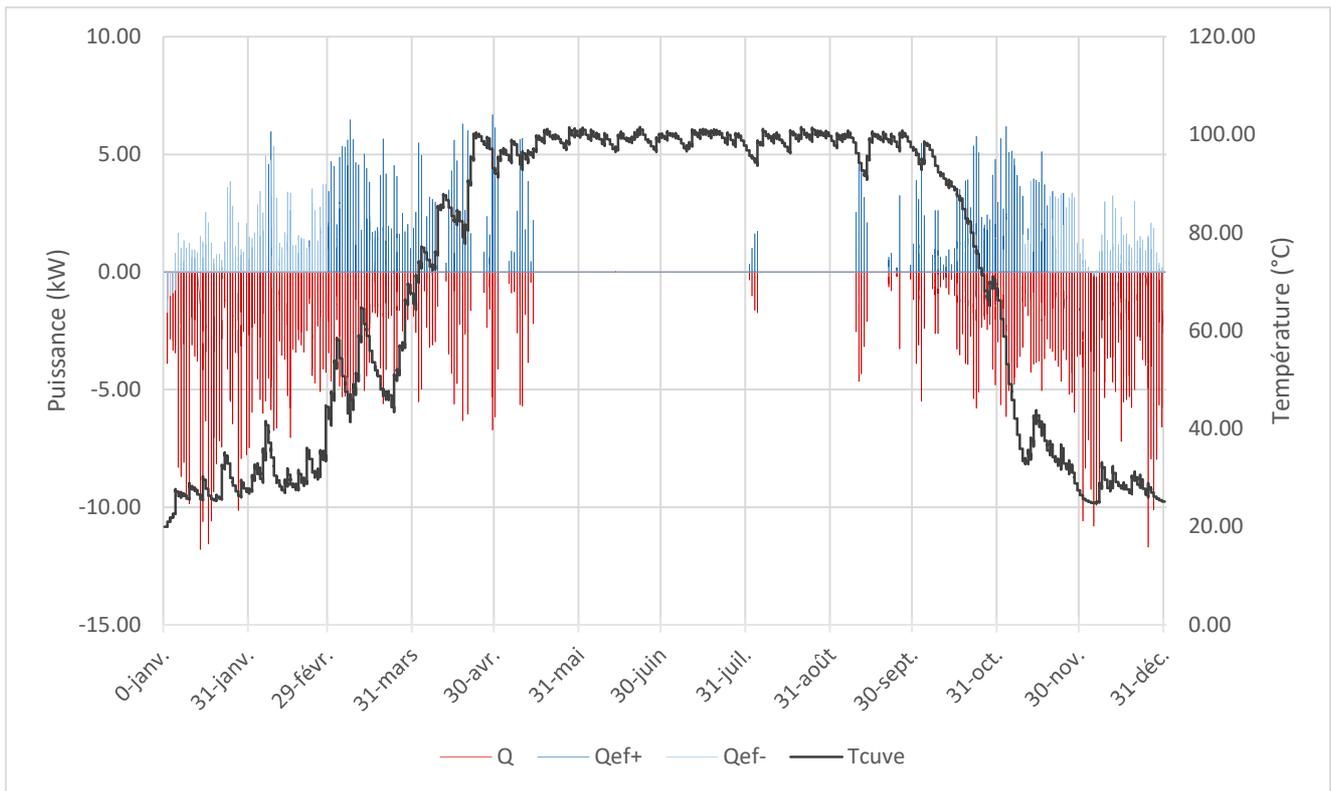


Figure 49 - Scénario 0 - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.

Lorsque nous sommes toutes les puissances demandées par l'habitation heure par heure, nous obtenons la demande annuelle de 4200 kWh. Cette demande est à comparer avec la valeur de 30,91 kWh/m²an qui correspond aux besoins nets en chauffage des cas 8, 9, et 10 de l'étude pour la commune de Villers le Bouillet. La maison fil rouge faisant 178m², nous avons une demande annuelle de 5502 kWh. Notre modélisation de l'habitation génère donc une demande nettement inférieure à celle générée par le logiciel PEB (24% de moins).

Nous pouvons observer trois cas :

- Lorsque la température de la cuve est en dessous de 25°C, le système ne fournit pas d'énergie à l'habitation car sa température est en dessous de la température basse de fonctionnement du plancher chauffant ;
- Lorsque la température de la cuve est entre 25 et 35°C, le système fournit de l'énergie à l'habitation mais pas assez pour couvrir tous les besoins. Cela vient du fait que la température de fonctionnement du plancher chauffant est de 35°C pour le débit imposé. Nous observons la courbe Qef- qui est dominante pendant les mois de janvier, février, novembre et décembre ;

- Au-dessus de 35°C, le système couvre entièrement les besoins de l'habitation. Nous observons donc la courbe Q_{ef} .

Lorsque nous faisons le rapport entre la demande et l'énergie fournie par le système, nous obtenons un ratio $Q_{ef}/Q=0,554$. Notre système couvre donc plus de la moitié des besoins de l'habitation.

Les moments où nous ne parvenons pas à répondre aux besoins de l'habitation correspondent principalement aux mois de janvier et de décembre. En effet, si l'on calcule le même ratio en excluant ces deux mois, nous obtenons $Q_{ef}/Q= 0,83$.

Une première réflexion sur les faibles performances du système en janvier pourrait lier les faibles températures (la non accumulation d'énergie dans la cuve) au fait que l'on démarre la simulation pendant l'un des mois les moins ensoleillés ; par conséquent, le système n'a pas le temps de se charger.

Cette explication est valable pour les premières heures où nous avons une température de cuve qui descend même en dessous de 20°C, puisqu'il s'agit des heures de nuit du 1^{er} janvier où nous n'avons aucun apport thermique seulement des pertes. Cependant, pour le reste du mois de janvier, cette explication ne tient plus puisque nous observons des résultats similaires en réalisant la simulation sur 2 ans.

Notre système ne permet donc pas de stocker assez d'énergie suffisamment longtemps pour pallier le manque de soleil des mois de décembre et de janvier.

Nous pouvons également remarquer que la charge générale du système (montée en température de la cuve) se fait bien plus lentement que la décharge générale. En effet, il faut environ deux mois pour passer d'une température de 35°C à 95°C (28 février – 21 avril), tandis qu'il ne faut qu'un mois pour faire l'inverse (8 octobre – 9 novembre).

Afin de réduire ce problème de décharge trop rapide, nous pourrions soit :

- Jouer sur le volume de stockage et la couche d'inertie afin d'augmenter la quantité d'énergie stockée et donc augmenter l'autonomie du système, sa capacité à assurer

les besoins de la maison même en cas de mauvais temps. Nous nous placerions dans une optique où le problème viendrait du dimensionnement du système ;

- Jouer sur la couche d'inertie et d'isolation afin de réduire les pertes. Nous nous placerions alors dans une optique où le problème concernerait les pertes du système.

IV.1.2. Coût

Comme annoncé dans le chapitre II.2, le coût étudié, ici, ne prend en compte que le surinvestissement initial de l'installation. Son amortissement ne sera pas calculé.

Pour le cas de base nous avons :

- Une cuve de 8.000 L facturée 5.300€ ;
- 43m² de panneaux solaire thermique que nous comptons, à la manière de Dupont & Hauglustaine (Rapport coûts/bénéfices des différents niveaux de performances énergétiques des bâtiments neufs, 2007), comme coûtant 1.000€ du m². De ce prix, nous déduisons les aides de la région Wallonne qui s'élèvent à 1.500€ pour 2 à 4 m² plus 200 euro par m² supplémentaire pour un maximum de 6.000€. Maximum que nous atteignons dans notre cas. Le prix de notre installation de collecteur s'élève donc à 37.000 € ;
- 27 m³ de sable à 55€/ m³ pour un total de 1.490 € ;
- Pour calculer le prix de l'isolant, nous nous sommes basés sur les prix au m² que nous avons multiplié par l'épaisseur des matériaux vendus. Il nous paraissait plus simple finalement d'exprimer tous les prix en m³. Nous avons 7,4 m³ de panneaux de chanvre à 135 €/ m³ pour un total de 993 € ;
- Pour les coûts de déblais nous avons calculé le volume de terre à déblayer multiplié par un coefficient de foisonnement de 1,33 qui correspond à une valeur moyenne entre la terre sèche, l'argile, les graviers et la terre végétale. Nous multiplions ensuite ce volume par un prix moyen de déblais de 30€/ m³. Le coût final, dans ces conditions, est de 3.231 €.

Le coût final de l'installation de base s'élève à 48.014 €.

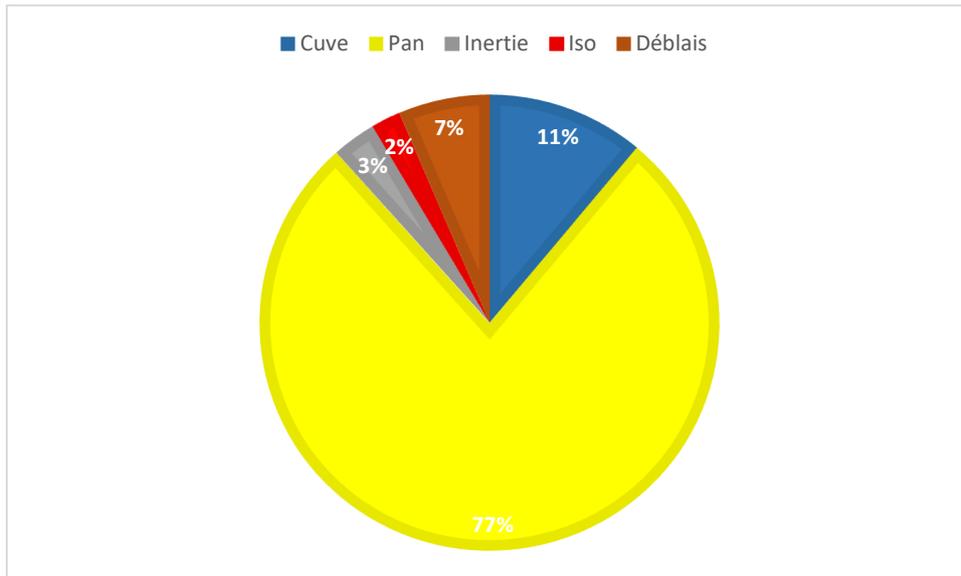


Figure 51 - Cas 0 - Répartition des prix

Nous pouvons voir que l'investissement principal correspond au prix des panneaux solaires, malgré les aides de la région Wallonne. Les prix des matériaux s'avèrent, finalement, assez dérisoires en comparaison des prix des installations (Déblais, cuve, panneaux).

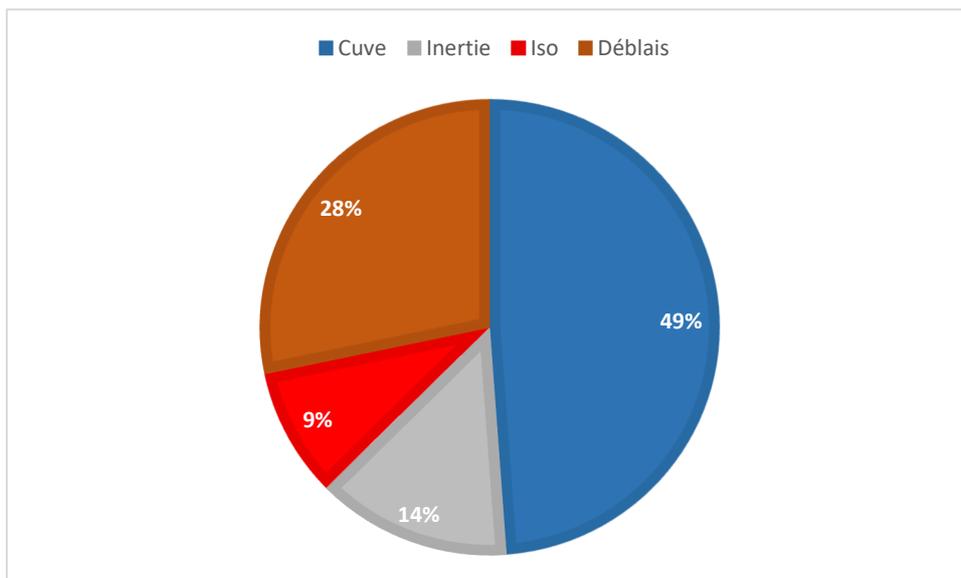


Figure 50 - Cas 0 - Répartition des prix sans les panneaux solaires thermiques

Ainsi, nous pouvons imaginer que faire varier les matériaux de la couche d'inertie ou d'isolant n'aura que peu d'impact sur le prix de l'installation.

IV.2. Influence de la géométrie du système

Nous étudions, à présent, les scénarios 18, 19 et 20. Le scénario 18 correspond une fois de plus au cas de base, tandis que le scénario 19 correspond à un volume de stockage de 4.500 L pour 24 m² de panneaux solaires (installation de monsieur Wallenberger) et le scénario 20 correspond à un volume de stockage de 12.000 L pour 60 m² de panneaux solaires (taille maximum de l'installation au vue de la surface de toiture Sud disponible).

IV.2.1. Performances

IV.2.1. a) Scénario 19, cuve de 12.000 L

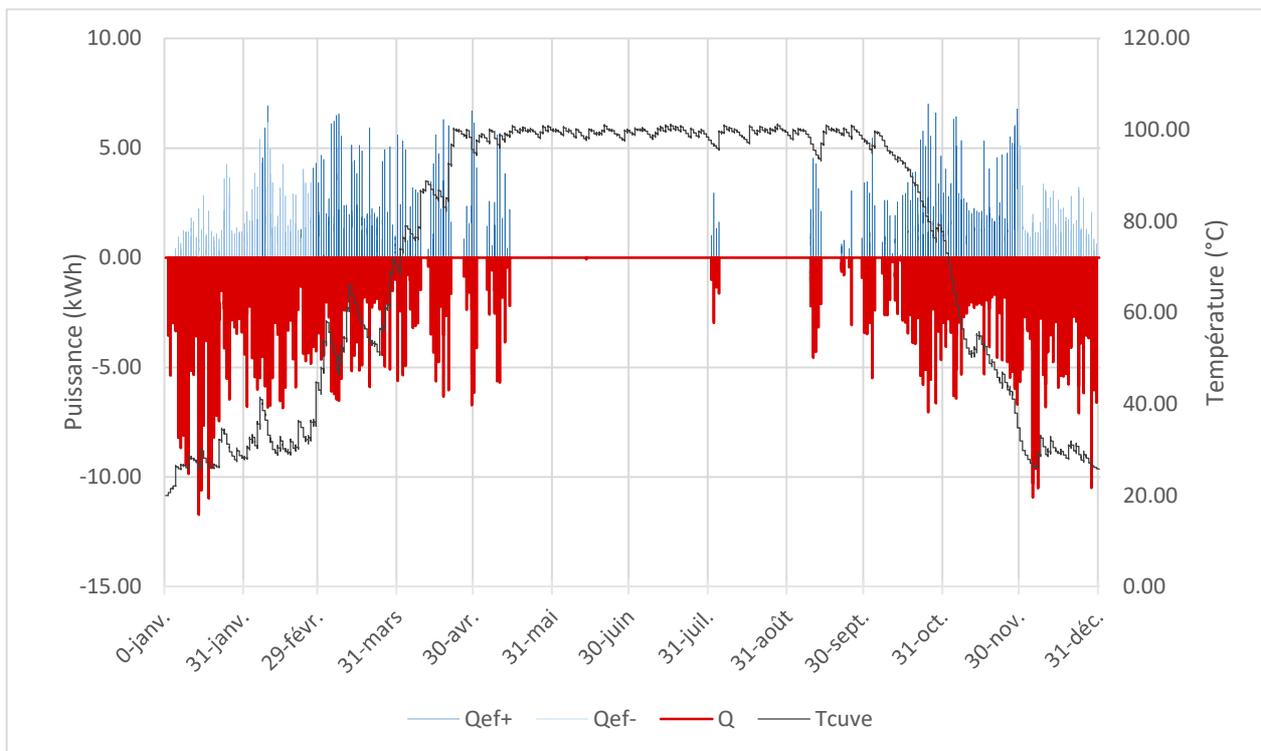


Figure 52 - Scénario 19 - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.

Avec un volume de cuve de 12.000 L, nous obtenons un $Q_{ef}/Q=0,638$. Nous parvenons alors à couvrir près de 64% des besoins en chauffage de l'habitation. Dans ce scénario, la période (approximative) pendant laquelle le système ne parvient pas à répondre aux besoins de l'habitation se « limite » aux trois mois d'hiver. Ici, la décharge du système est moins rapide que dans le scénario 0. En effet, le volume de stockage étant de 50 % plus important, les réserves faites pendant les beaux jours mettent plus de temps à s'épuiser, ce qui explique les performances du système en novembre.

IV.2.1. b) Scénario 20, cuve de 4.500 L

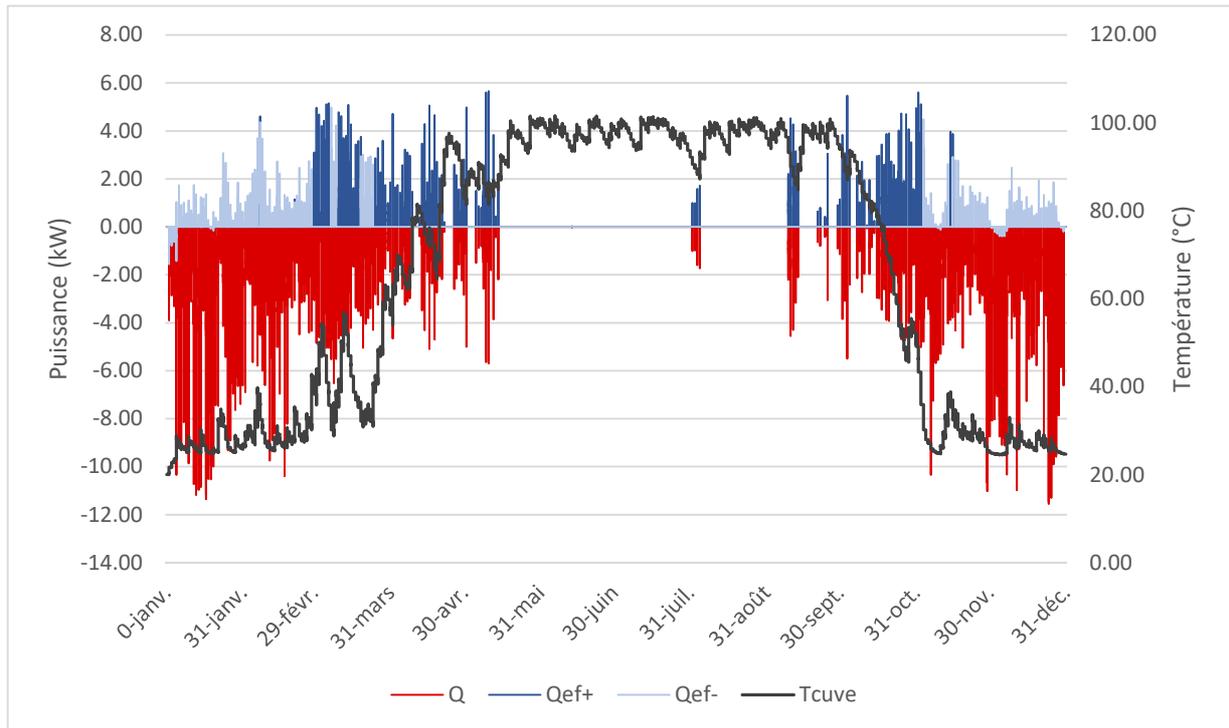


Figure 53 - Scénario 20 - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.

Avec un volume de cuve de 4.500 L, nous obtenons un $Q_{el}/Q=0,397$. Dans ce scénario, le système permet de couvrir les besoins de la maison seulement à partir du mois d'avril et jusqu'au mois de novembre. Nous pouvons également remarquer que même pendant les mois d'été, la température de la cuve oscille fortement (même si les besoins de l'habitation sont entièrement couverts). Le volume de stockage ne semble donc pas permettre une grande autonomie et se vide très rapidement.

IV.2.1. c) Comparaison des scénarios

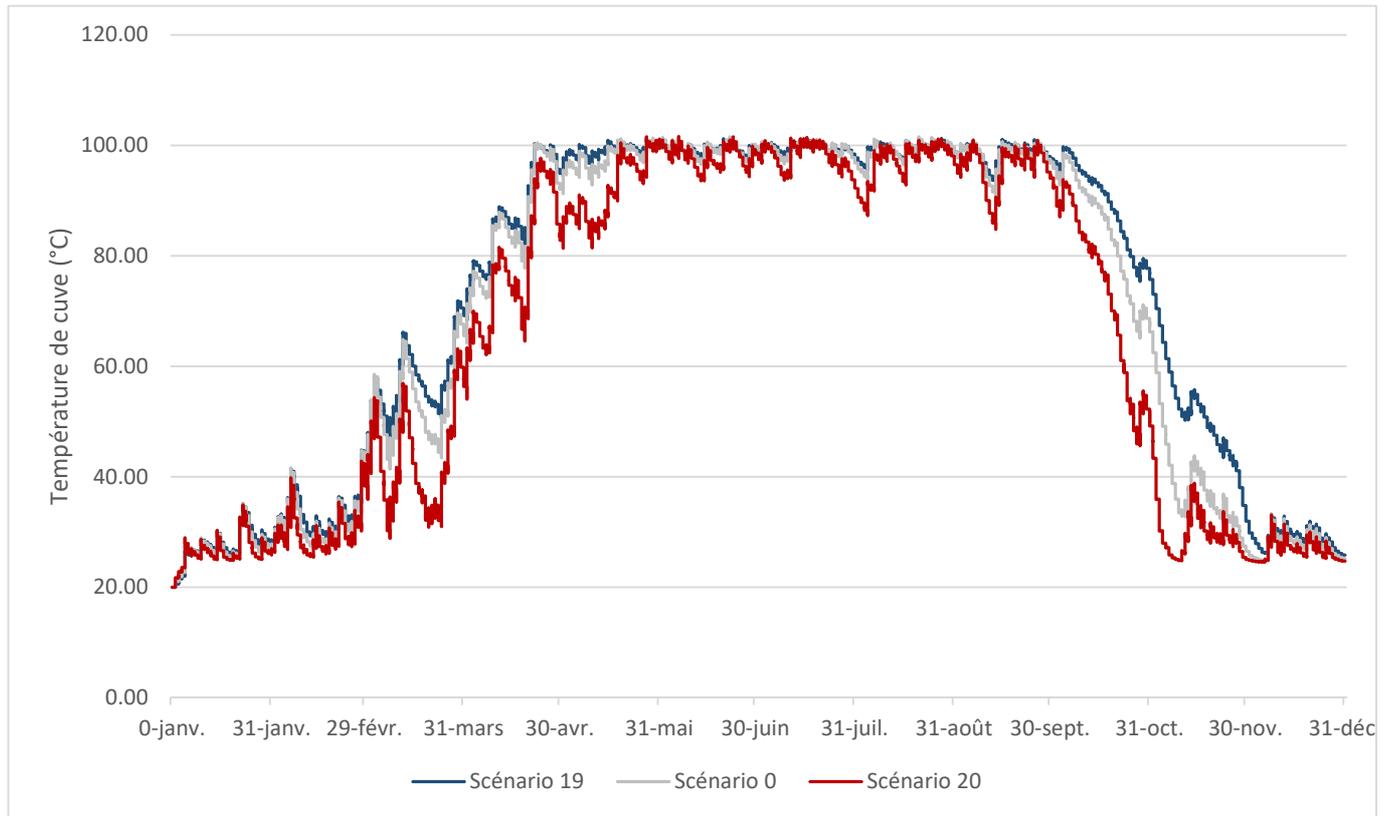


Figure 54 - Evolution des températures de cuve pour trois volumes différents

Lorsque nous superposons les températures de cuve des scénarios 0, 19 et 20, nous pouvons aisément deviner les scénarios correspondants à chaque courbe.

- La courbe rouge, la plus froide, correspond au scénario 20. Le faible volume de stockage induit des variations de température plus rapides, ce qui induit une courbe plus chaotique que les autres ;
- La courbe bleue correspond au scénario 19. Le volume de stockage étant plus important (tout comme la surface de panneaux solaires), la décharge du système est plus lente. Ce phénomène s'observe au cours des mois d'octobre et de novembre ;
- La courbe grise, qui oscille entre les courbes bleue et rouge, correspond au scénario 0.

Nous pouvons voir que, pendant la période de charge générale du système (de janvier à mai environ), le volume de charge n'importe que peu à partir d'un certain niveau. En effet, les courbes grise et bleue sont très proches. D'ailleurs, entre le 1 mars et le 31 mai, les scénarios 0 et 19 ont tous deux un rapport $Q_{ef}/Q > 0,998$.

Cependant, nous pouvons observer, grâce au scénario 20, qu'une diminution trop importante du volume de stockage (réduction de 44% par rapport au scénario 0) diminue les performances du système pendant la phase de charge. Ainsi, entre le 1^{er} mars et le 31 mai, le rapport Q_{ef}/Q du scénario 20 est de 0,94, soit plus de 5% de moins que le cas de base.

Nous pouvons néanmoins noter que le volume de stockage joue un rôle particulièrement important à la fin de l'automne. À la fin du mois de septembre, les trois cuves sont au-dessus de 90°C mais, pendant les mois d'octobre et de novembre, les températures chutent. Par ailleurs, la vitesse à laquelle cette température chute est très différente en fonction du volume de stockage considéré. Ainsi, la température d'un plus gros volume baissera moins vite, celui-ci ayant stocké plus d'énergie pendant les beaux jours. Une cuve qui baisse plus vite en température est une cuve qui passera plus tôt sous la barre des 35°C (barre en dessous de laquelle notre système ne peut plus répondre totalement aux besoins de l'habitation). Le mois de novembre est assez intéressant :

- La cuve de 4.500 L arrive à la barre des 35°C (elle passe pour la première fois en dessous le 3 novembre) ;
- La cuve de 8.000 L est proche de la cuve de 4.500L mais légèrement en dessus (elle passe pour la première fois en dessous des 35°C le 9 novembre) ;
- La cuve de 12.000 L est bien au-dessus des deux autres (elle ne passera en dessous des 35°C que le 29 novembre).

Ce décalage de température se traduit par des rapports Q_{ef}/Q très différents pendant le mois de novembre. Ainsi :

- Pour le scénario 19, $Q_{ef}/Q=0,99$;
- Pour le scénario 0, $Q_{ef}/Q=0,85$;
- Pour le scénario 20, $Q_{ef}/Q=0,42$.

Par conséquent, nous définissons une période caractéristique ΔT comme étant l'écart entre le premier passage en dessous des 35°C et le dernier passage au-dessus des 35°C. Dans notre cas, ΔT s'étend du 3 novembre au 29 novembre (assez proche du mois de novembre que nous avions pressenti grâce au graphique).

Scénario	Premier passage en dessous des 35°C	Dernier passage au-dessus des 35°C	Qef/Q pendant ΔT
0	9 novembre	24 novembre	0,87
19	29 novembre	29 novembre	1
20	3 novembre	15 novembre	0,38

Tableau 5 - Définition de la période ΔT et Qef/QΔT

Ce sont ces différences, lors de la décharge, qui sont principalement responsables des différences de ratio Qef/Q sur l'année entière.

IV.2.2. Coût

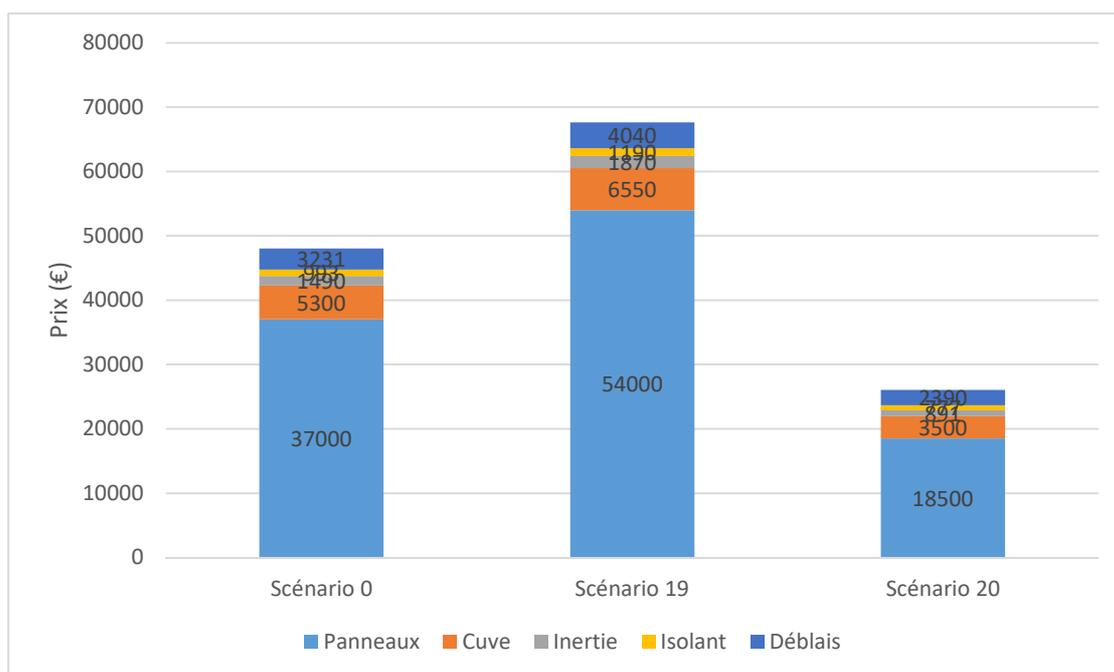


Figure 55 - Coût de l'installation en fonction du volume de stockage

Nous pouvons remarquer que, dans tous les cas (même pour une petite installation), la principale dépense est due aux panneaux solaires. Le prix total de l'installation oscille entre 6 et 6,5 fois le prix du volume de la cuve (ration prix/volume(L) de 6,5 pour le scénario 0, de 6 pour le scénario 19 et de 6,3 pour le scénario 20).

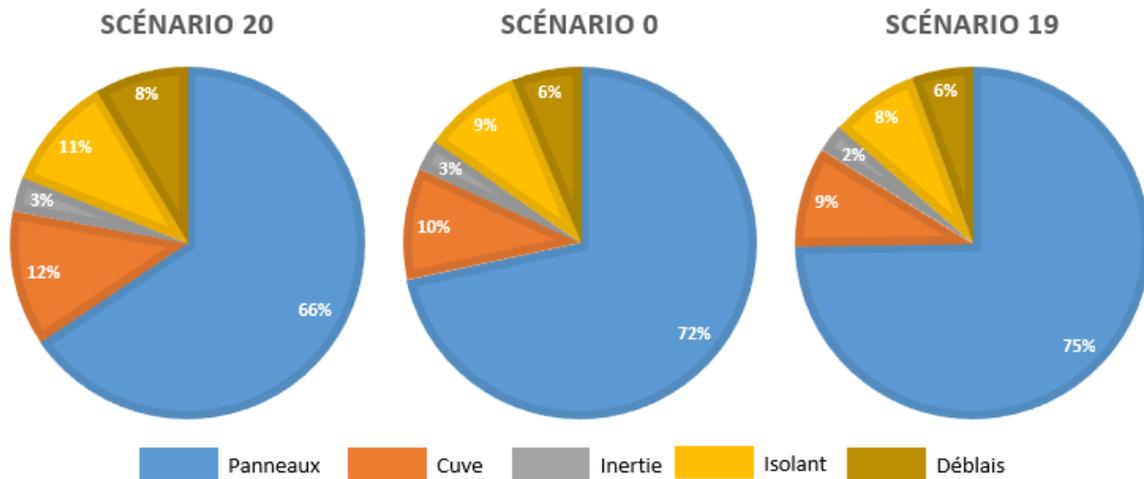


Figure 56 - Part des coût en fonction du volume de stockage

En s'intéressant à la part de ces coûts pour chaque installation, nous remarquons que les panneaux prennent une part de plus en plus importante avec le volume de stockage.

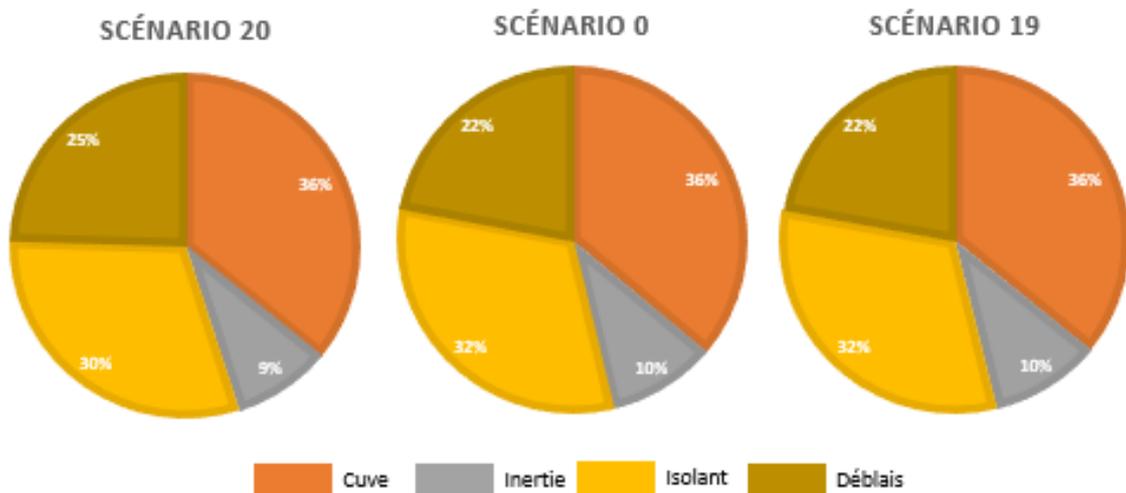


Figure 57 - - Part des coût en fonction du volume de stockage sans les panneaux solaires

En effet, nous pouvons voir que si nous ne considérons pas le coût des panneaux solaires, les parts qu'occupent les autres dépenses ne varient que très peu.

IV.3. Influence de la stratification thermique

En encodant un degré de stratification thermique de 3 dans TRNSYS, nous obtenons les résultats suivants :

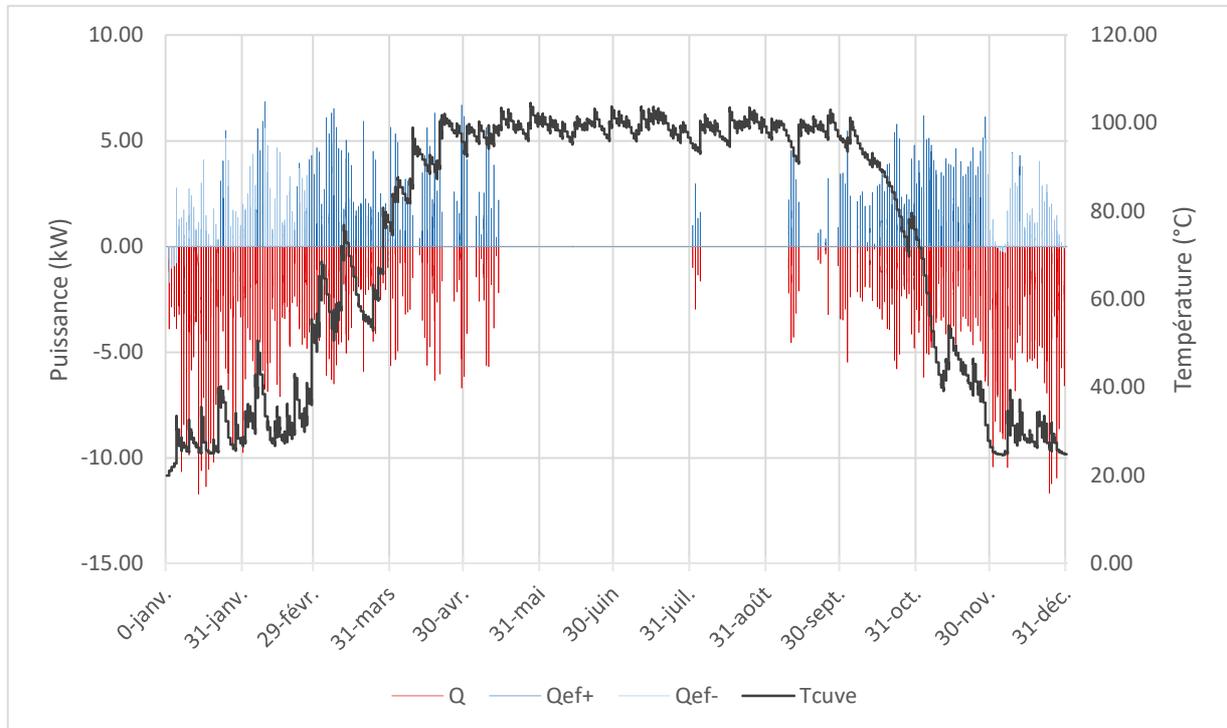


Figure 58 - Scénario 17 - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.

Dans ce scénario, les matériaux, leur épaisseur, le volume de la cuve et la surface de panneaux solaires thermiques sont identiques au cas de base. Seul l'orientation de la cuve change. Nous avons, ici, une cuve verticale dans laquelle le phénomène de stratification thermique se produit.

Dans ce scénario nous obtenons un Q_{ef}/Q de 0,60. Soit 5% de plus que le cas de base.

Comme nous avons une stratification thermique, nous devons distinguer la température du haut de la cuve de celle du bas de la cuve. Sur la Figure 58, nous avons représenté la température du haut de la cuve puisque c'est celle-là même qui va alimenter notre plancher chauffant et définir si le système répond aux besoins de l'habitation.

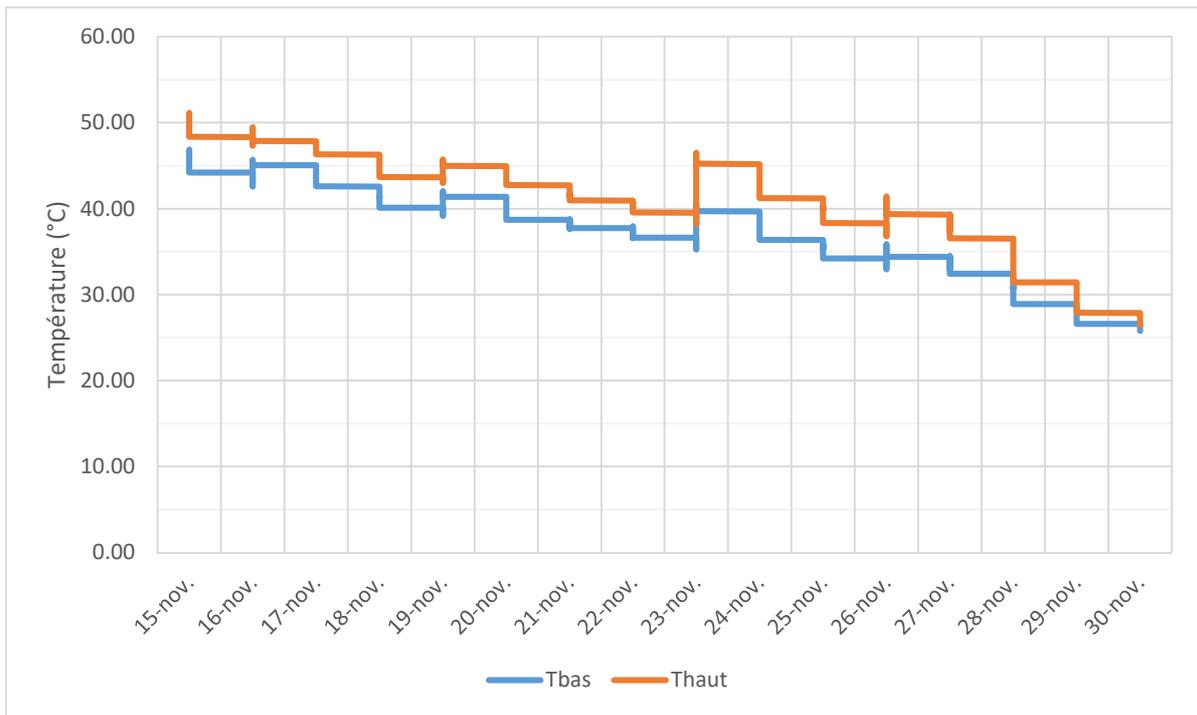


Figure 59 - Scénario 17 - Evolution des température haute et basse de la cuve pendant la décharge du système

Ici, pour le haut et le bas de la cuve, le passage sous les 35°C se fait une seule fois. Cela est une conséquence de la stratification thermique : la température de toute la cuve n'a pas à monter pour faire fonctionner le plancher chauffant, ce qui augmente le rendement de l'installation. Nous pouvons voir sur le graphique ci-dessus que le bas de la cuve passe sous la barre des 35°C le 25 novembre tandis que le haut de la cuve passe la barre le 28 novembre. Cela signifie que, jusqu'au 28 novembre (et ce, depuis le 26 février), le système de stockage permet de subvenir à 100% des besoins en chauffage de l'habitation.

IV.4. Influence de la couche d'isolation

IV.4.1. Performances

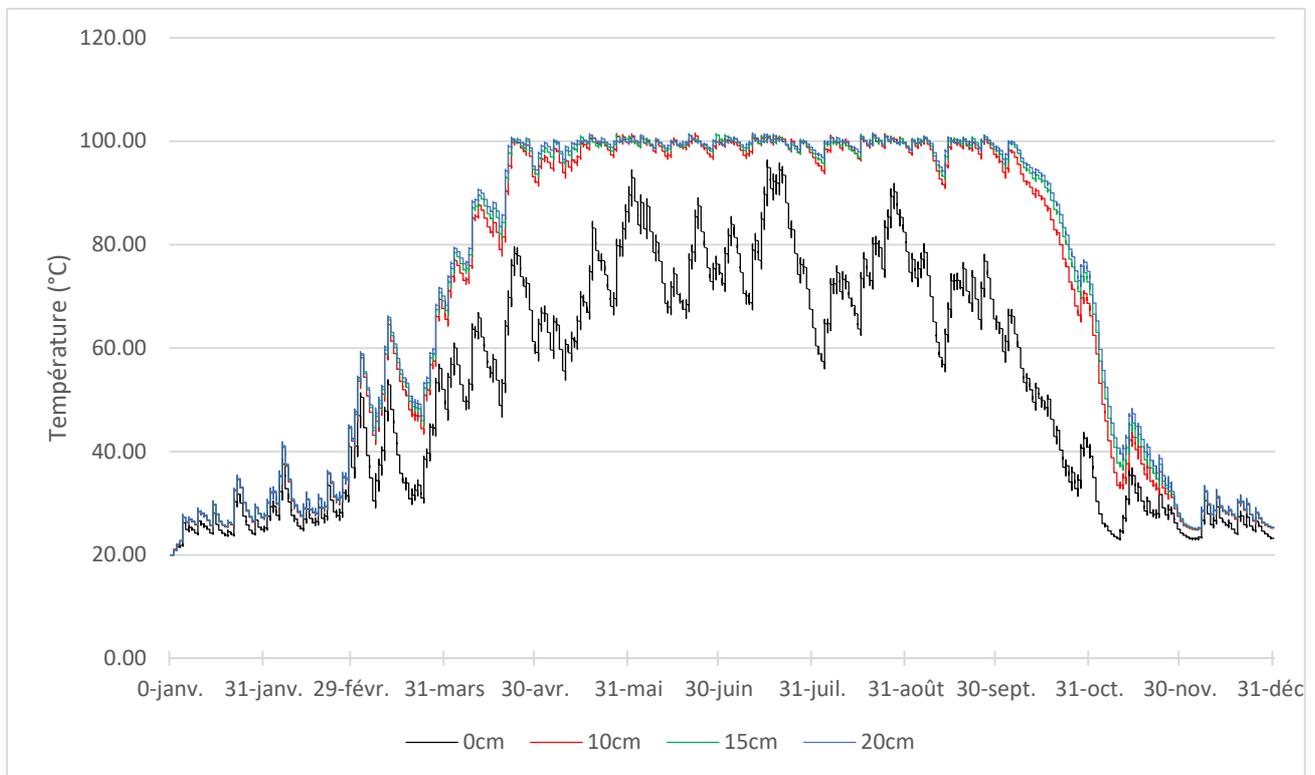


Figure 60 - Evolution des températures de cuve en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolant

Nous pouvons remarquer, sur ce graphique, qu'il y a une très grande différence au niveau des températures entre un système sans couche isolante (courbe noire) et notre cas de base (courbe rouge). Cependant, l'impact des dix premiers centimètres d'isolant sur l'évolution de la température de la cuve n'est pas du tout le même que celui des dix suivants. En effet, les courbes rouge (10cm d'isolant) et bleue (20cm d'isolant) sont très proches.

Nous pouvons, toutefois, noter que même si l'impact semble minime, une augmentation de l'épaisseur d'isolant induit une augmentation de la température de la cuve. Cela provient du fait qu'en augmentant l'épaisseur e de la couche, nous augmentons sa résistance thermique $R = e/\lambda$. Nous diminuons ainsi les pertes thermiques du système.

Les performances du système sur l'année augmentent donc avec l'épaisseur d'isolant. Cependant, c'est à nouveau lors de la décharge générale du système que l'influence de l'épaisseur d'isolant est la plus marquante. Ainsi, comme nous l'avons vu lors de notre étude de « Influence de la géométrie du système », nous définissons la période caractéristique ΔT en ne considérant ici que les épaisseur 10, 15 et 20 cm. Nous laissons, en effet, le scénario sans isolant de côté car l'écart important entre ses valeurs et les valeurs des autres scénarios risque de nous faire considérer une période trop longue et donc « d'écraser » les résultats. Notre ΔT s'étend donc, ici, du 9 novembre au 26 novembre.

Épaisseur (cm)	Qef/Q Année	Premier passage en dessous des 35°C	Dernier passage au-dessus des 35°C	Qef/Q ΔT
0	0,321	X	X	0,39
10	0,554	9 novembre	24 novembre	0,91
15	0,568	22 novembre	24 novembre	0,97
20	0,575	23 novembre	26 novembre	0,98

Tableau 6 - Synthèse de l'influence de la couche d'isolant

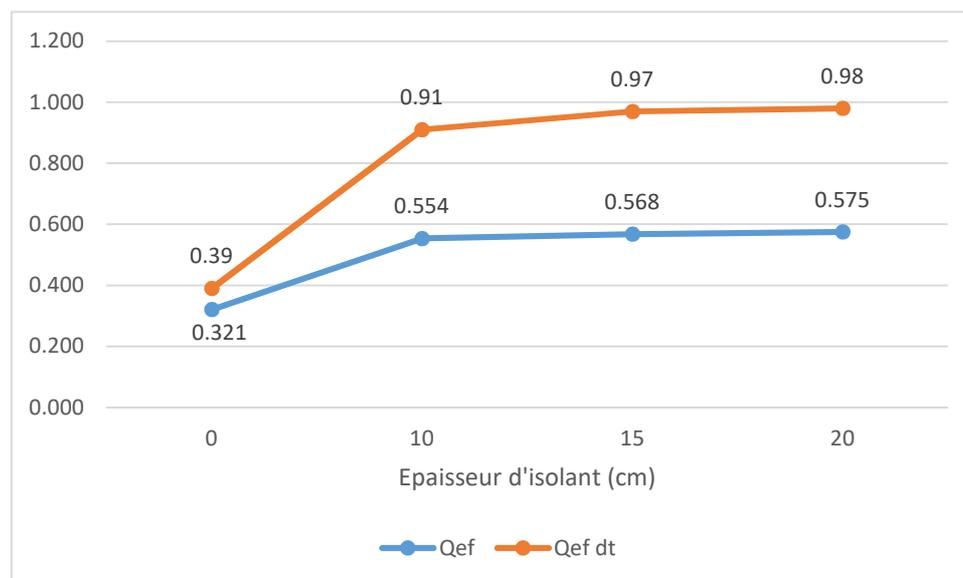


Figure 61 - Évolution des ratio Qef/Q Année et Qef/Q ΔT en fonction de l'épaisseur d'isolant

Nous voyons que sur l'année, les 10 premiers centimètres d'isolant nous font passer d'un ratio Qef/Q de 0,32 à un ratio de 0,55. Soit un gain de 23%.

Après cela, nous n'augmentons le ratio Qef/Q que d'environ 1% pour chaque 5 cm d'isolant supplémentaire.

IV.4.2. Coût

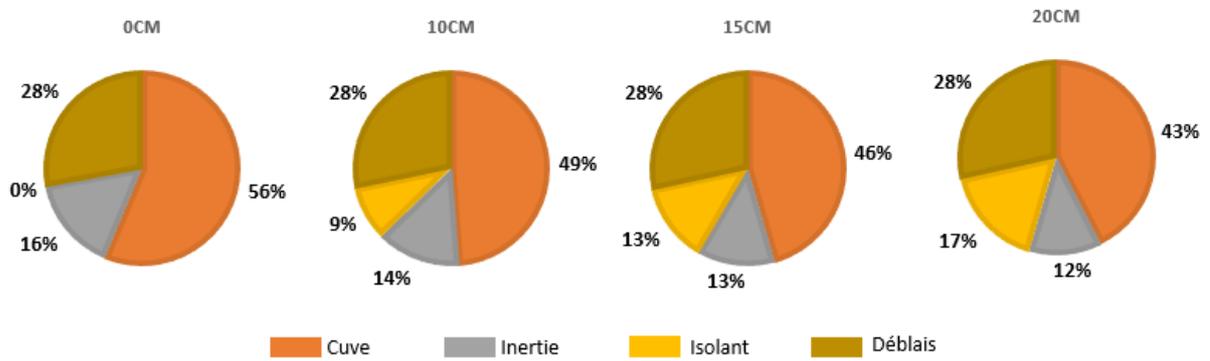


Figure 62 - Répartition des coûts en fonction de l'épaisseur d'isolant sans les panneaux thermiques

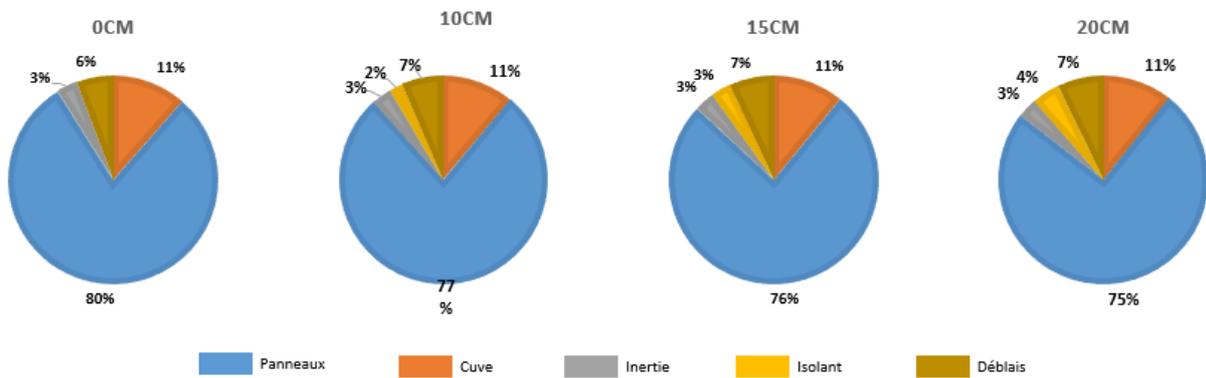


Figure 63 - Répartition des coûts en fonction de l'épaisseur d'isolant

Nous pouvons remarquer que, face au prix des panneaux solaires thermiques, le coût de la couche d'isolant est minime dans tous les cas. Même lorsque l'on met de côté les panneaux solaires thermiques, l'isolant ne représente qu'au maximum 17% du coût restant.

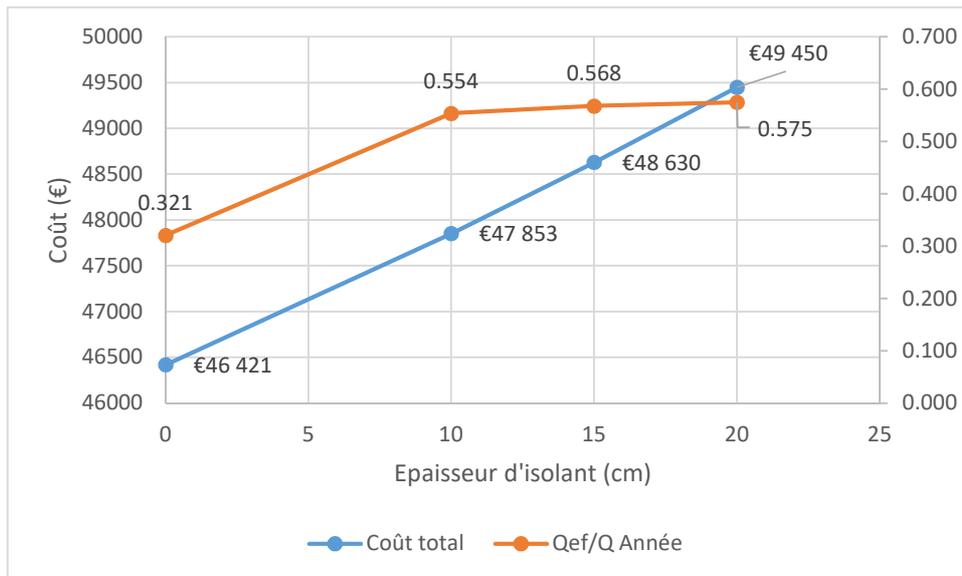


Figure 64 - Évolution des performances et du coût total en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolant

Nous pouvons voir grâce à ce graphique qu'une augmentation de 5 cm de la couche d'isolant induit une augmentation d'environ 800 € du prix total. Cette augmentation ne sera néanmoins pas linéaire car une augmentation de x % de l'épaisseur induit une augmentation supérieure à x % du volume. La courbe prix/épaisseur sera donc convexe. À contrario, il semblerait que la courbe Qef/Q / épaisseur soit une courbe concave.

Se sont donc les premiers centimètres d'isolant qui sont les plus rentables.

IV.5. Influence de la couche d'inertie

Nous allons nous intéresser, à présent, à la couche d'inertie qui fait la particularité de ce système. Le but étant d'observer, tout d'abord, si cette couche à un réel impact sur les performances du système, en faisant varier en premier le matériau la constituant puis son épaisseur. Cependant, le jeu sur l'épaisseur de la couche est toutefois restreint par la modélisation TRNSYS, il est donc possible que les variations que nous allons mettre en place ne soient pas assez significatives pour générer de réelles variations dans les performances de notre système. Nous étudierons ensuite le coût des différents scénarios.

IV.5.1. Performances

IV.5.1. a) Le matériau

Nous étudions ici 4 matériaux différents : le sable (cas de base), le béton maigre, la brique en terre cuite pleine et la cellulose.

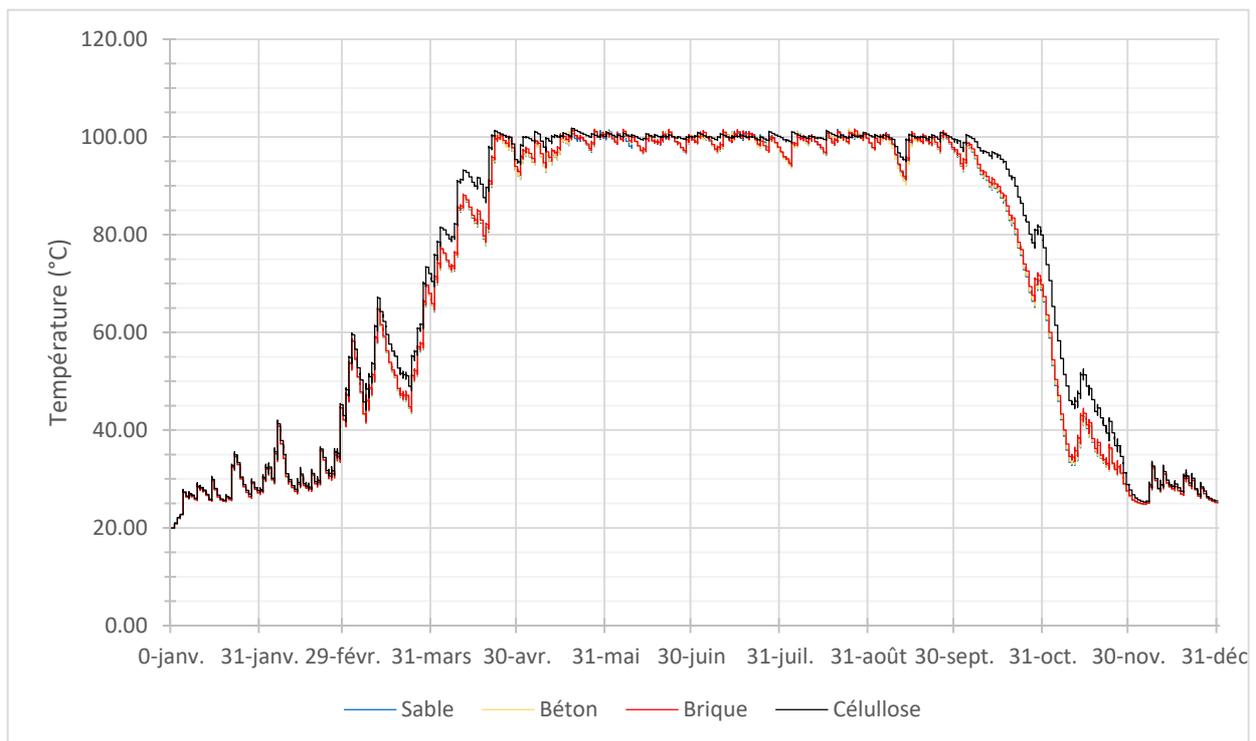


Figure 65 - Évolution de la température de la cuve en fonction du matériau de la couche d'inertie

Nous pouvons voir sur la Figure 65 que les courbes de températures des trois matériaux à bonne inertie (sable, brique et béton) sont très proches. Seule la courbe correspondant à la cellulose se démarque.

Matériau	Qef/Q Année	λ (W/mK)	C (J/mK)	α (m ² /s)	$\alpha*1000$	premier passage en dessous des 35°C	dernier passage au-dessus de 35°C	Qef/Q ΔT
Sable	0.554	2.00	2000	0.00100	1.00	9 nov.	24 nov.	0.89
Béton	0.555	1.65	2000	0.00083	0.83	9 nov.	24 nov.	0.89
Brique	0.557	1.15	1634	0.00070	0.70	9 nov.	24 nov.	0.91
Cellulose	0.590	0.04	51	0.00078	0.78	27 nov.	27 nov.	1.00

Tableau 7 - Synthèse de l'influence du matériau de la couche d'inertie

Les valeurs de Qef/Q étant très proches, nous étudierons particulièrement l'état du système pendant la période caractéristique afin de dégager des tendances plus nettes.

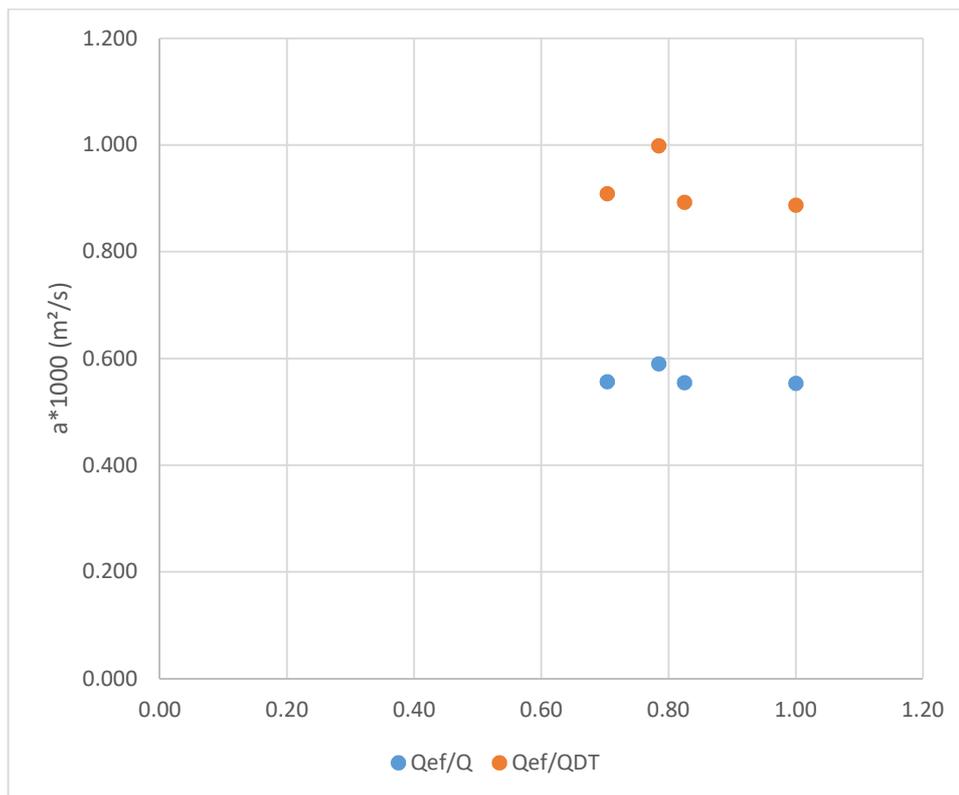


Figure 66 - Diffusivité des matériaux en fonction des performances

La grandeur caractéristique de l'inertie thermique est la diffusivité thermique α (m²/s). Cette diffusivité thermique représente la capacité d'un matériau à transmettre une variation de chaleur d'un point A à un point B. Elle dépend donc de λ (conductivité thermique) qui représente la capacité du

matériau à conduire la chaleur et de C (capacité thermique volumique) qui représente la capacité du matériau à stocker la chaleur.

En observant le graphique ci-dessus, nous nous rendons compte qu'il est difficile de faire un lien entre l'inertie du matériau (représenté par sa diffusivité) et les performances du système, que ce soit à l'année ou pendant la période caractéristique.

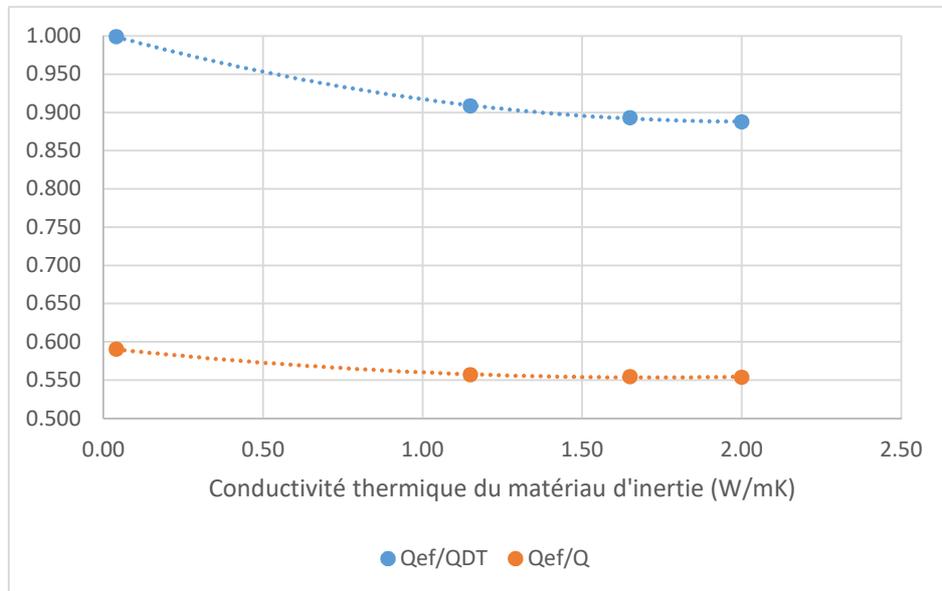


Figure 67 - Performances du système en fonction de la conductivité thermique du matériau de la couche d'inertie

Cependant, lorsque nous traçons les performances en fonction de la conductivité thermique du matériau de la couche d'inertie, une tendance se dégage. Cette tendance est en fait la continuité du point soulevé dans l'étude de l'influence de la couche d'isolant. En faisant augmenter l'épaisseur de la couche d'isolant e nous faisons augmenter la résistance thermique de la couche $R=e/\lambda$. Nous avons observé que lorsque e augmente les performances du système augmentent. Ici, lorsque la conductivité thermique du matériau diminue, nous avons à nouveau une augmentation de la résistance thermique de la couche, réduisant alors les pertes thermiques du système et améliorant ainsi ses performances.

Nous avons vu, dans le paragraphe IV.4.1, qu'après les dix premiers centimètres une augmentation de l'épaisseur de la couche d'isolant n'avait que peu d'impact sur les performances du système. Ici, en considérant la cellulose comme matériau pour la couche d'inertie, nous avons une composition équivalente à 60 cm d'isolant (10 de la couche d'isolant et 50 de cellulose). Nous pouvons, en effet, constater que ces 40 cm d'isolant ajoutés n'ont fait augmenter le ratio Q_{ef}/Q que de 2% par rapport à la situation avec 20 cm d'isolant (et cependant 50 cm de sable à ne pas oublier).

IV.5.1. b) L'épaisseur de la couche

Matériau	épaisseur	Qef/Q	Qef/QDT
Sable	0	0,550	0,875
Sable	20	0,551	0,880
Sable	50	0,554	0,888
Sable	60	0,554	0,896
Béton	0	0,550	0,875
Béton	20	0,553	0,884
Béton	50	0,555	0,893
Béton	60	0,556	0,901
Brique	0	0,550	0,875
Brique	20	0,554	0,887
Brique	50	0,557	0,909
Cellulose	0	0,550	0,875
Cellulose	20	0,581	0,985
Cellulose	50	0,590	0,999

Tableau 8 - Résultats de l'étude sur l'épaisseur de la couche d'inertie

Les ratios Qef/Q résultants des variations d'épaisseur de la couche d'inertie sont très proches les uns des autres. Nous nous intéresserons donc une fois de plus aux performances du système durant la période caractéristique.

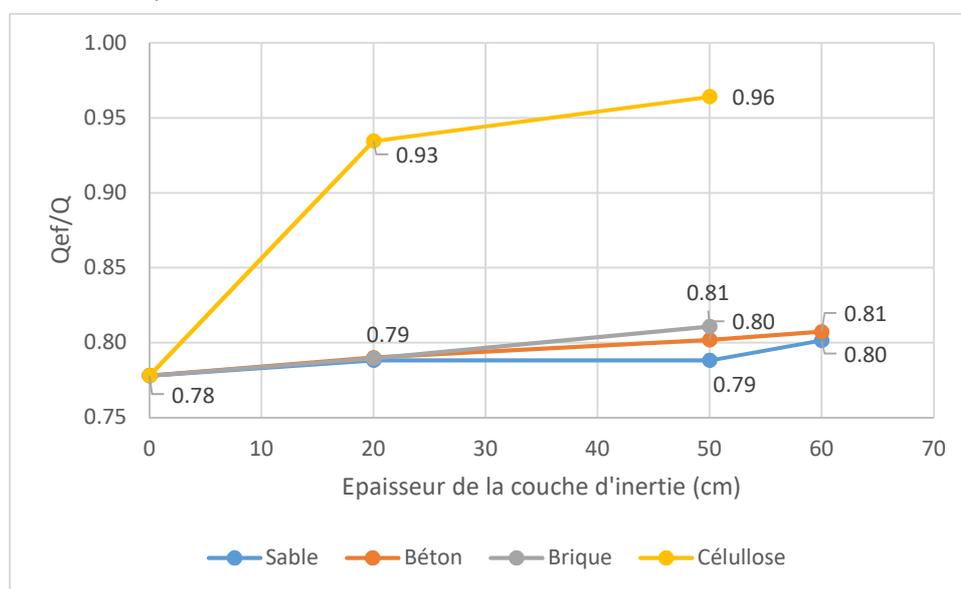


Figure 68 - Évolution des performances durant la période caractéristique en fonction de l'épaisseur de la couche d'inertie

Pour tous les matériaux, le ratio Q_{ef}/Q pendant la période caractéristique augmente avec l'épaisseur de la couche. Cette augmentation est d'autant plus importante que le λ du matériau est grand.

IV.5.2. Coût

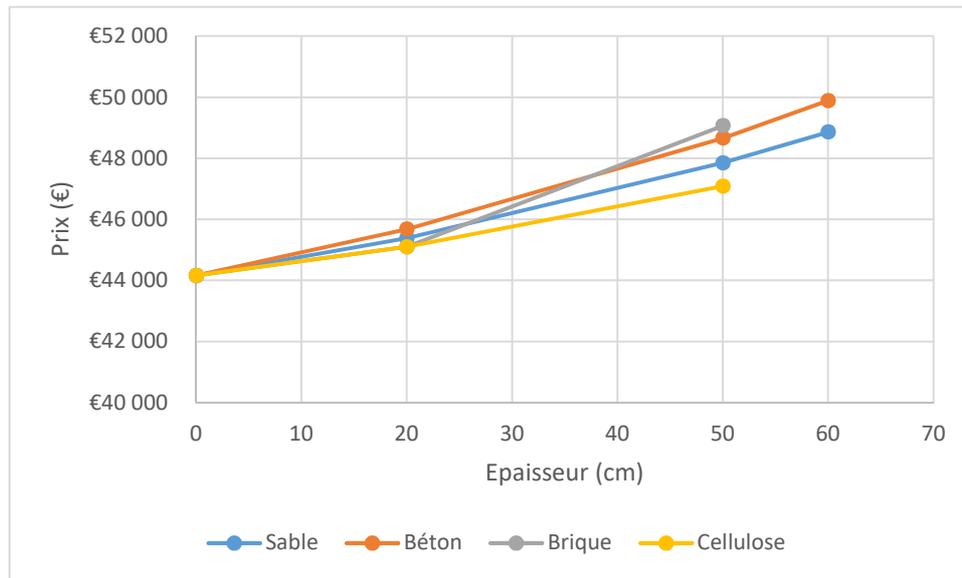


Figure 69 - Évolution du coût de l'installation en fonction de l'épaisseur et du matériau de la couche d'inertie

Nous pouvons voir sur le graphique ci-dessus qu'une augmentation de l'épaisseur de la couche d'inertie entraîne une forte augmentation du prix de l'installation totale, pouvant aller jusqu'à +5000 € ce qui représente 10% du prix total.

Il faut mettre en rapport cette augmentation de 5000 € avec le gain de ration Q_{ef}/Q . Ainsi, déboursier 5000 € supplémentaires ne nous ferait économiser que 1% de notre facture en énergie chaque année.

IV.6. Discussion

IV.6.1. L'étude sur le climat belge

Pour rappel, la liste des scénarios étudiés :

Scénario	Isolant	e (cm)	Inertie	e (cm)	Volume (m3)	hauteur (m)	rayon (m)	ration h/d	position
0	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
1	chanvre	10	x	x	8,0	4,8	0,73	3,3	h
2	chanvre	10	sable	20	8,0	4,8	0,73	3,3	h
3	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
4	chanvre	10	sable	60	8,0	4,8	0,73	3,3	h
5	chanvre	10	béton	20	8,0	4,8	0,73	3,3	h
6	chanvre	10	béton	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
7	chanvre	10	béton	60	8,0	4,8	0,73	3,3	h
8	chanvre	10	brique	20	8,0	4,8	0,73	3,3	h
9	chanvre	10	brique	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
10	chanvre	10	cellulose	20	8,0	4,8	0,73	3,3	h
11	chanvre	10	cellulose	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
12	x	x	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
13	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
14	chanvre	20	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
15	chanvre	15	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
16	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
17	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	v
18	chanvre	10	sable	50	8,0	4,8	0,73	3,3	h
19	chanvre	10	sable	50	12	5,5	0,83	3,3	h
20	chanvre	10	sable	50	4,5	4	0,60	3,3	h

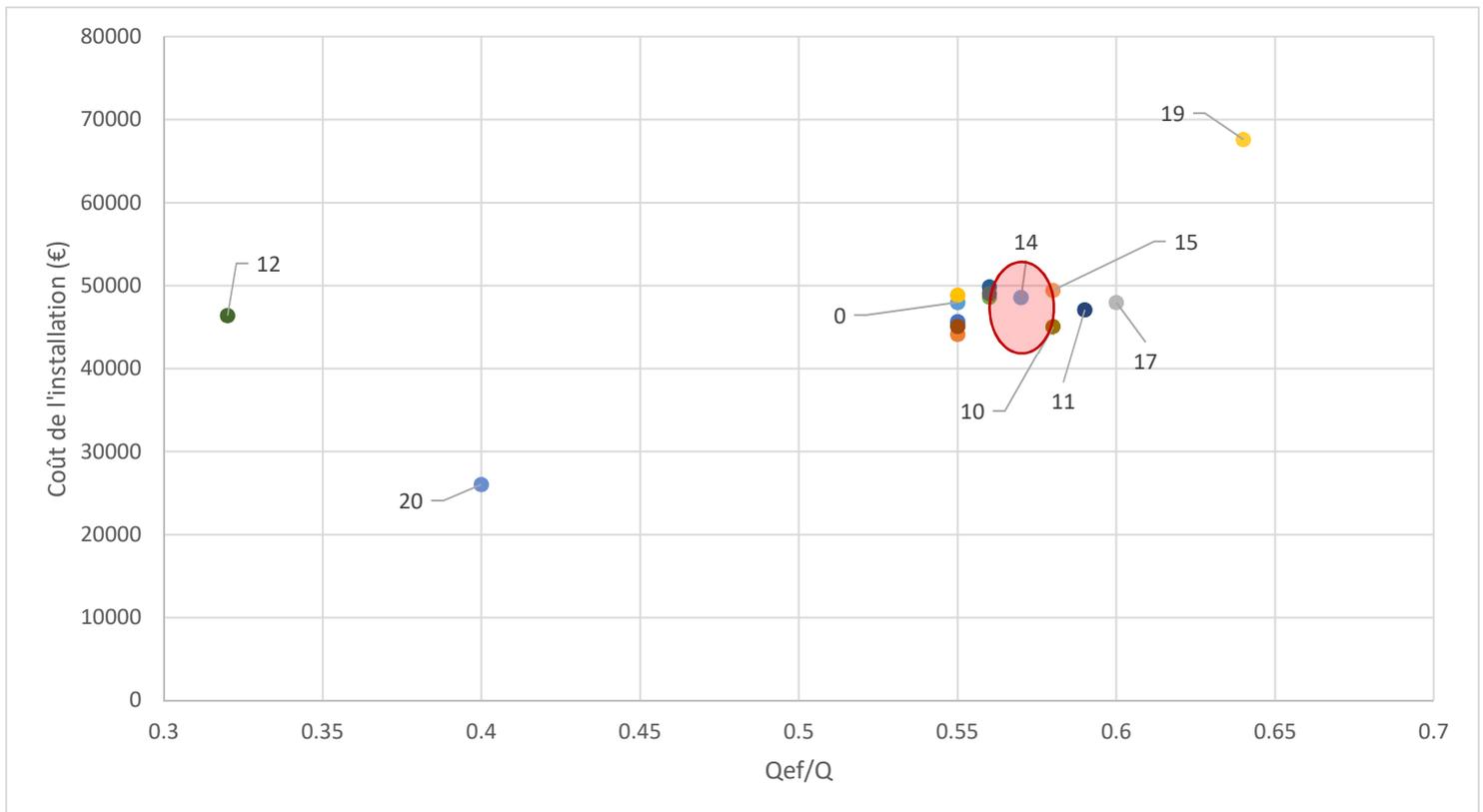


Figure 70 - Répartition des scénarios en fonction du ration Q_{ef}/Q et du coût total

Le graphique ci-dessus synthétise les résultats des études précédentes. Dans la zone rouge, nous retrouvons les scénarios dans lesquels nous avons fait varier la couche d'inertie, à l'exception des scénarios 10 et 11, où nous avons remplacé le matériau d'inertie par de la cellulose.

Du côté des faibles performances, nous retrouvons les scénarios 20 et 12 :

- Le scénario 12 correspond au système sans couche d'isolant. Le système reste donc cher puisque seul le coût de l'isolant est retranché du coût de base. Ce scénario ne présente donc pas d'intérêt puisqu'il est cher et peu performant ;
- Le scénario 20 représente le système adapté à une cuve de 4.500 L. Ici, le système est peu couteux puisqu'en réduisant le volume de stockage nous avons également réduit la surface de panneaux solaires, part principale de la dépense. Cependant ce faible coût dû au sous-dimensionnement implique un ratio Q_{ef}/Q de seulement 0,42.

Autre scénario qui sort du lot, le scénario 19 qui correspond au surdimensionnement du système.

Enfin le scénario 17, qui présente de bonnes performances à prix modéré, correspond à l'hypothèse d'une cuve verticale. Hors, une telle installation est plus difficile à mettre en œuvre dans le cas d'une cuve enterrée.

Ces scénarios extrêmes ont peu de chance d'être mis en place soit à cause de leur coût, soit de leurs performances.

Il semblerait que la meilleure solution soit la mise en place d'une cuve isolée (sans toutefois trop l'isoler car la hausse de performances ne contrebalance pas le surcoût engendré) sans forcément de couche d'inertie.

Cependant, un tel système représente toujours un coût d'installation important (supérieur à 45.000€) pour des performances ne couvrant pas plus de 60% de la demande de l'habitation. Ce système sera donc forcément mis en place en parallèle d'un autre système de chauffage.

Nous ne pouvons donc pas considérer ce système comme une réelle alternative aux moyens de chauffage actuels et son amortissement sera donc réduit d'une part à cause de son faible rendement ($Q_{ef}/Q < 0,6$), mais également à cause de la nécessité d'installer (et donc de payer) un autre système de chauffage.

IV.6.2. Etude rapide du climat du sud de la France

L'inspiration originale de ce travail de fin d'étude, étant l'installation de monsieur Wallenberger à Cadenet (Vaucluse, 84), nous avons également décidé de lancer une simulation avec le climat du sud de la France.

Pour cela, nous avons placé notre scénario 20 (cuve de 4500 L alimentée par 23 m² de panneaux) sous l'influence du climat météonorm de Carpentras (84). Cette installation se rapproche de celle de monsieur Wallenberger, avec une différence possible (puisque nous ne connaissons pas le niveau d'isolation thermique de l'habitation de monsieur Wallenberger) au niveau des besoins de l'habitation. En effet, notre habitation est faite pour correspondre à la réglementation thermique actuelle dont les exigences n'ont peut-être pas été remplies par monsieur Wallenberger en 1979.

Nous avons choisi de lancer la simulation sur 2 ans. En effet, contrairement aux différents scénarios soumis au climat belge, le départ de la cuve en condition hivernale risque de changer les

résultats de manière significative si nous nous contentons d'une année. Sur les deux ans de résultats, nous avons ensuite calculé Q_{ef}/Q entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre de la deuxième année. Nous obtenons un Q_{ef}/Q de 0,968.

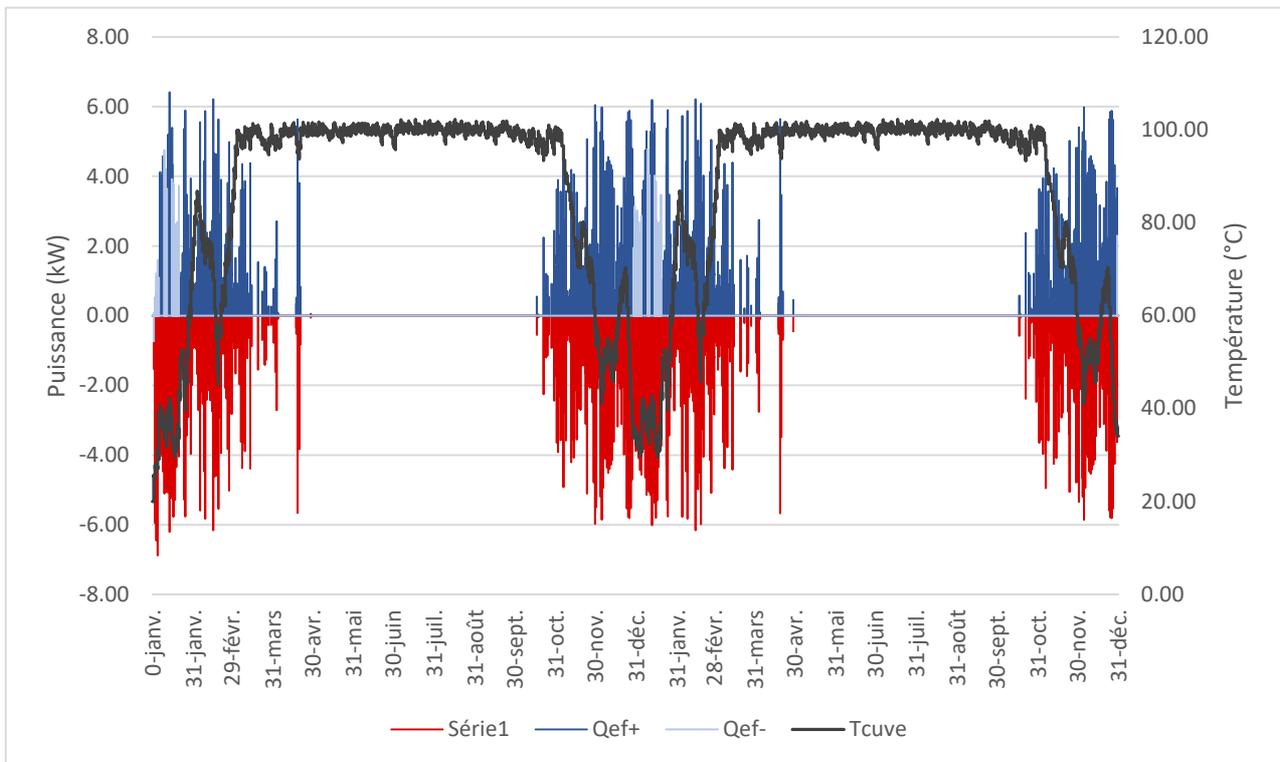


Figure 71 - Scénario 20 soumis au climat de Carpentras - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.

Nous pouvons voir, ici, que le passage de la cuve en dessous des 35°C se fait beaucoup plus tard. En effet, la cuve est en dessous des 35°C que 248 h par an (étalées entre le 29 décembre et le 19 janvier). Or, nous obtenons tout de même un ratio $Q_{ef}/Q=0,94$ pendant les mois de décembre et de janvier. Bien que la température de cuve soit en dessous des 35°C, elle ne descend pas en dessous des 30°C, ce qui permet d'alimenter le plancher chauffant de manière correcte.

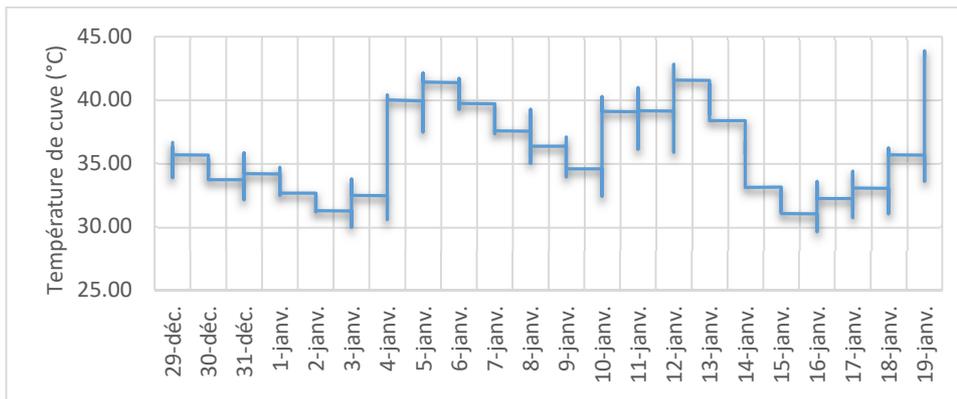


Figure 72 - Evolution de la température de cuve entre le 29 décembre et le 19 janvier

Ces très bonnes performances sont évidemment à mettre en relation avec les faibles besoins en chauffage d'une telle habitation soumise à ce climat en particulier.

En observant la Figure 72, nous nous sommes également intéressés à l'impact de la stratification thermique sur l'expérience précédente. En effet, la température de cuve ne descendant pas très bas, nous pouvions supposer que la stratification thermique permettrait de garder un haut de cuve au-dessus de 35°C pendant que le bas est en dessous. Nous avons donc lancé la simulation.

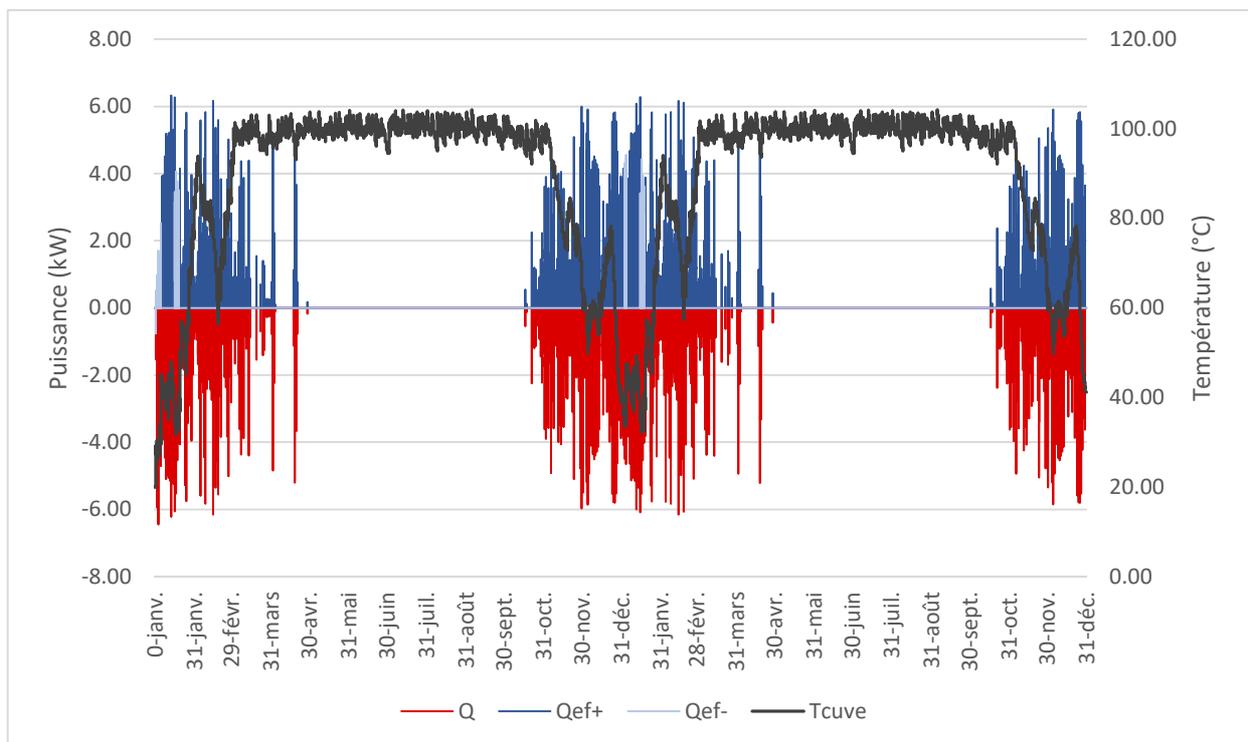


Figure 73 - Scénario 20 soumis au climat de Carpentras avec stratification thermique - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.

Dans ce cas, le ratio $Q_{ef}/Q=0,994$. Le système, ici, permet de couvrir la quasi intégralité des besoins de l'habitation. En effet, la température du haut de la cuve ne passe en dessous des 35°C que 54 h par an (entre le 3 janvier et le 18 janvier).

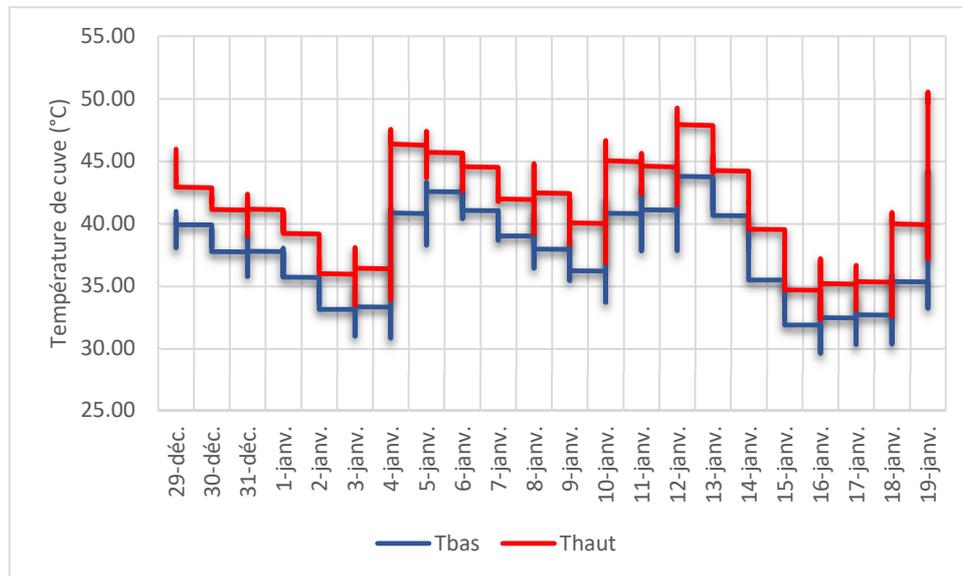


Figure 74 - Evolution de la température du haut et du bas de la cuve entre le 29 décembre et le 19 janvier

Nous pouvons voir sur le graphique ci-dessus que le phénomène de stratification thermique est assez efficace et que nous passons donc de 248 h en dessous de 35°C à 54 h par an, nous permettant de gagner non seulement quelques % sur le ratio Q_{ef}/Q à l'année mais surtout un confort fortement amélioré en hiver.

V. Conclusion

Nous avons tenté, au travers de cette étude, d'étudier les performances ainsi que le coût de base d'un système dont le principe de fonctionnement paraît assez évident mais qui n'est pourtant que très peu utilisé en France et en Belgique. Ce système est assez répandu en Autriche, comme en témoigne monsieur Wallenberger et madame Von Vintschger.

La singularité de ce système réside dans une épaisseur de matériau à forte inertie thermique (comme le sable, le béton, ou la brique) entourant la cuve d'eau et permettant d'accroître la capacité de stockage et de déphaser le stockage du déstockage.

Cependant, nos expériences nous ont conduites à constater que ce système ne produisait pas le résultat escompté. En effet, nous n'avons pas trouvé de lien entre l'inertie du matériau et les performances du stockage. Nous ne pouvons par conséquent réaliser de conclusion générale, car peut-être que d'autre critère que nous n'avons pas fait varier comme la surface de panneaux solaires thermique ou encore certains critères que nous n'aurions pas assez fait varier, comme l'épaisseur de la couche d'inertie, nous auraient permis de dégager une tendance.

Toujours est-il que, selon nos hypothèses, le critère possédant la plus grande influence sur les performances du système s'est révélé être l'isolation de la cuve. Néanmoins, la rentabilité due à l'augmentation de l'épaisseur de la couche isolante reste limitée. En effet, il s'est avéré que les premiers centimètres d'isolant étaient les plus rentables.

Si nous ne prenions pas en compte le coût, nous pourrions penser qu'il suffit de surdimensionner le système afin d'augmenter le ratio Q_{ef}/Q . Or, la réalité économique désigne rapidement ce choix comme non viable.

Une autre solution, assez économique mais plus difficile à mettre en œuvre, consiste à utiliser le phénomène de stratification thermique, phénomène qui à lui seul, nous permet d'augmenter de 5% le ratio Q_{ef}/Q de l'installation.

Enfin, lors de notre dernière partie, nous avons commencé à étudier le même système mais dans un climat plus clément, celui dont bénéficie monsieur Wallenberger à Cadenet. Les résultats sont alors probants. Une telle installation dans le sud de la France peut permettre la quasi autonomie de l'habitation en chauffage (Q_{ef}/Q entre 0,96 et 0,99) alors qu'elle ne permet de couvrir seulement 40% des besoins de l'habitation soumise au climat belge.

Nous n'avons pas réalisé la simulation avec le climat autrichien, mais nous pourrions imaginer que celui-ci est plus proche du climat belge que du climat du sud de la France, étant donné la situation géographique de ces deux pays. La question du développement de ce type de stockage en Autriche, et non en France, reste donc en partie à élucider.

Bibliographie

(s.d.).

(s.d.). Récupéré sur elyotherme.fr: <https://elyotherm.fr/principe-stratification-ballon-eau-chaude>

AQUAWAL; CEHD;. (2015). *Etude sur les consommations résidentielles d'eau et d'énergie en Wallonie*.

Basecq, V., Michaux, G., Inard, C., & Blondeau, P. (2013). Short-term storage systems of thermal energy for buildings: a review. *Advances in Building Energy Research*.

Cabeza, L., Martorell, I., Miro, L., Fernandez, A., & Barreneche, C. (2015). Introduction to thermal energy storage (TES) systems. Dans L. F. Cabeza (Éd.), *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. Woodhead Publishing.

Cabeza, L., Sole, C., Castell, A., Oro, E., & Gil, A. (2012). Review of Solar Thermal Storage Techniques and Associated Heat Transfer Technologies. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), pp. 525-538.

Dickinson, R., Cruickshank, C., & Harrison, S. (2012). Charge and discharge strategies for a multi-tank thermal energy storage. *Applied Energy*, 109(2013), 366-373.

Dincer, I., & Rosen, M. (2011). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. Winley.

Dupont, G., & Hauglustaine, J. M. (2007). *Rapport coûts/bénéfices des différents niveaux de performances énergétiques des bâtiments neufs*.

Etat de l'Environnement Wallon. (2018, 01 16). Récupéré sur Etat de l'Environnement Wallon: <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/MEN%205.html>

Fernandez, I., Martinez, M., Segarra, M., Martorell, I., & Cabeza, L. (2010). Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94(2010), 1723-1729.

Furbo, S. (2015). Using water for heat storage in thermal energy storage (TES) systems. Dans *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. Elsevier Ltd.

- Futura Planete.* (2018). Récupéré sur Futuraa Science: <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-potentiel-energetique-energie-solaire-999/>
- Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Al. (2009). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*
- Hasnain, S. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: Heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management, 39*(11), 1127-1138.
- IEA Energy statistics.* (2015). Récupéré sur IEA: <https://www.iea.org/Sankey/>
- levers, S., & Lin, W. (2009). Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank. *Applied Energy, 86*(12), 2604-2614.
- Leroy, C. (2018, 07 03). *Trends Tendances.* Récupéré sur Trends Tendances: <http://trends.levif.be/economie/immo/la-fin-des-maisons-4-facades-en-wallonie/article-normal-755993.html>
- Li, P.-W., & Chan, C. (2017). *Thermal Energy Storage Analyses and Designs.* Elsevier Science.
- Nourricier, S., FELDEIM, V., Feldeim, V., Lybaert, P., Dupont, G., & Hauglustaine, J. M. (2006). *Performance énergétique des bâtiments résidentiels en Région wallonne : Etude relative à la détermination de la consommation d'énergie primaire de référence.*
- Novo, A., Bayon, J., Castro-Fresno, D., & Rodriguez-Hernander, J. (2010). Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits. *Applied Energy, 87*(2), 390-397.
- Pavlov, G., & Olesen, B. (2011). Building thermal energy storage – Concepts and applications. *12th International Conference on Air Distribution in Rooms.* Norway.
- Pinel, P., Cruickshank, C., Beausoleil-Morrison, I., & Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(7), 37-49.

Pintaldi, S. (2017). *Medium Temperature Thermal Energy Storage for High Efficiency Solar Cooling Applications*.

Qualit'EnR. (2018). *Les français et les énergies renouvelables*.

Tian, & Zhao. (2012). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 538-551.

Wallonie Iweps. (2018, 06 01). *Wallonie Iweps*. Récupéré sur <https://www.iweps.be/indicateur-statistique/nombre-et-taille-des-menages/>

Winter, D. (1991). *Solar collectors, energy storage, and*. The MIT press.

Yan, J., & Yang, X. (2018). Thermal energy storage. *Applied Energy*.

Table des figures

Figure 1 - Stratégies d'utilisation et de stockage (Li & Chan, 2017)	9
Figure 2 - Part des publications traitant du stockage thermique en fonction des continents. 10	
Figure 3 - Évolution du nombre de publication traitant de stockage thermique.....	10
Figure 4 - Schéma de principe du stockage parfait (Li & Chan, 2017,p. 8).....	17
Figure 5 – Deux exemples d’un système avec fluide caloporteur comme matériau de stockage utilisant le principe de stratification thermique (Li & Chan, 2017,p. 9).....	17
Figure 6 - Design des solutions avec matériau de stockage différent du fluide caloporteur. (Li, Chan, 2017, p. 12).....	20
Figure 7 - Principe de charge d'un stockage comportant une stratification thermique (Li, Chan, 2017, p. 11).....	23
Figure 8 - Chaleur spécifique massive en fonction du coût au kg (Fernandez, Martinez, Segarra, Martorell & Cabeza, 2010)	27
Figure 9 - Evolution de la densité de l'eau en fonction de la température.....	28
Figure 10 - Stock d'eau chaude sans stratification (elyotherme.fr, s.d.).....	29
Figure 11 - Principe de stratification du stock d'eau chaude (elyotherme.fr, s.d.)	29
Figure 12 - Schéma de principe du stockage de base.....	33
Figure 13 - Plan du RDC de la maison fil rouge.....	36
Figure 14 - Plan du R+1 de la maison fil rouge	36
Figure 15 - Façade Nord.....	37
Figure 16 - Façade Ouest	37
Figure 17 - Façade Est.....	37
Figure 18 - Façade Sud.....	38
Figure 19 - 13 cas étudié pour la commune de Villers-le-Bouillet.....	39
Figure 20 - Arborescence de TRNBuild	44

Figure 21 - Orientations dans TRNBuild	45
Figure 22 - Création de massive layer pour les mur de l'habitation.....	46
Figure 23 - Encodage d'une parois - ici les murs de l'habitation (MH).....	47
Figure 24 - Définition d'une fenêtre dans TRNBuild.....	48
Figure 25 - définition des gains.....	49
Figure 26 - Profil d'occupation de week-end.....	50
Figure 27 - Profil d'occupation de jour de semaine	50
Figure 28 - Profil d'occupation hebdomadaire.....	51
Figure 29 - Planning de température de semaine	52
Figure 30 - Planning de température de week-end.....	52
Figure 31 - Planning de chauffage hebdomadaire.....	53
Figure 32 - Fenêtre d'encodage d'une zone	55
Figure 33 - Encodage de la cuve d'eau	57
Figure 34 - Encodage d'un "massive layer"	58
Figure 35 - Encodage des murs.....	58
Figure 36 - Relation de la zone vers la cuve	59
Figure 37 - relation de la cuve vers la zone	60
Figure 38 - système général TRNSYS	61
Figure 39 – Relation « fichier météo – zone d'habitation »	62
Figure 40 - Relations "collecteurs-cuve"	63
Figure 41 - Relations "Pompe-Collecteur"	63
Figure 42 - Relations "Cuve-Pompe"	63
Figure 43 - Relation "Régulateur-Pompe"	64
Figure 44 - Relation "Régulateur-Régulateur"	64
Figure 45 - Relation "Cuve-Régulateur".....	64
Figure 46 - Relation "collecteur-régulateur"	64

Figure 47 - Hystérésis du régulateur	64
Figure 48 - Schéma de principe de la boucle de décharge	65
Figure 49 - Scénario 0 - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.....	69
Figure 50 - Cas 0 - Répartition des prix sans les panneaux solaires thermiques.....	72
Figure 51 - Cas 0 - Répartition des prix.....	72
Figure 52 - Scénario 19 - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.....	73
Figure 53 - Scénario 20 - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.....	74
Figure 54 - Evolution des température de cuve pour trois volumes différents	75
Figure 55 - Coût de l'installation en fonction du volume de stockage	77
Figure 56 - Part des coût en fonction du volume de stockage	78
Figure 57 - - Part des coût en fonction du volume de stockage sans les panneaux solaires ...	78
Figure 58 - Scénario 17 - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.....	79
Figure 59 - Scénario 17 - Evolution des température haute et basse de la cuve pendant la décharge du système	80
Figure 60 - Evolution des températures de cuve en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolant	81
Figure 61 - Évolution des ratio $Q_{ef}/Q_{Année}$ et $Q_{ef}/Q_{\Delta T}$ en fonction de l'épaisseur d'isolant	82
Figure 62 - Répartition des coût en fonction de l'épaisseur d'isolant sans les panneaux thermiques	83
Figure 63 - Répartition des coût en fonction de l'épaisseur d'isolant.....	83
Figure 64 - Évolution des performances et du coût total en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolant	84
Figure 65 - Évolution de la température de la cuve en fonction du matériau de la couche d'inertie	85
Table des figures	
Discussion	102

Figure 66 - Diffusivité des matériaux en fonction des performances	86
Figure 67 - Performances du système en fonction de la conductivité thermique du matériau de la couche d'inertie	87
Figure 68 - Évolution des performance durant la période caractéristique en fonction de l'épaisseur de la couche d'inertie	88
Figure 69 - Évolution du coût de l'installation en fonction de l'épaisseur et du matériau de la couche d'inertie.....	89
Figure 70 - Répartition des scénarios en fonction du ration Q_{ef}/Q et du coût total	91
Figure 71 - Scénario 20 soumis au climat de Carpentras - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.	93
Figure 72 - Evolution de la température de cuve entre le 29 décembre et le 19 janvier	94
Figure 73 - Scénario 20 soumis au climat de Carpentras avec stratification thermique - Évolution des besoins de la maison, de la puissance fournie par le système et de la température de cuve.	94
Figure 74 - Evolution de la température du haut et du bas de la cuve entre le 29 décembre et le 19 janvier	95

Liste des tableaux

Tableau 1 - Caractéristiques des matériaux de stockage sensible usuels	26
Tableau 2 - Composition des parois	40
Tableau 3 - Scenarios envisagés	43
Tableau 4 - Scénarios étudiés	68
Tableau 5 - Définition de la période ΔT et $Q_{ef}/Q\Delta T$	77
Tableau 6 - Synthèse de l'influence de la couche d'isolant	82
Tableau 7 - Synthèse de l'influence du matériau de la couche d'inertie	86
Tableau 8 - Résultats de l'étude sur l'épaisseur de la couche d'inertie	88