



**HAL**  
open science

# Optimisation de l'enveloppe d'un bâtiment passif à l'aide de la simulation thermique dynamique

Erik Chisholm

► **To cite this version:**

Erik Chisholm. Optimisation de l'enveloppe d'un bâtiment passif à l'aide de la simulation thermique dynamique. Eco-conception. 2013. dumas-01143036

**HAL Id: dumas-01143036**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01143036>**

Submitted on 16 Apr 2015

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

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

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**

**PARIS**

---

**CHAIRE DE TRAVAUX PUBLICS ET BATIMENT**

---

**Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'Ingénieur CNAM**

**SPECIALITE : CONSTRUCTION - AMENAGEMENT**

**OPTION : BATIMENT**

**Par : M Erik CHISHOLM**

**Optimisation de l'Enveloppe d'un Bâtiment Passif à l'aide de la Simulation  
Thermique Dynamique**

**Soutenu le: 19 Septembre 2013**

**JURY**

**PRESIDENT : M Francis GUILLEMRD**

**MEMBRES : M Joseph PAÏS**

**M Jean Sébastien VILLEFORT**

**M Walid LARBI**

**M Issa JAFFAL**

**M Gabriel BAJEUX**







# Table de matières

Table de matières .....	5
Avant-propos .....	8
Résumé .....	10
Introduction .....	12
Chapitre 1.....	16
Conception d'une maison passive .....	16
1.1 Les principes d'une conception passive .....	17
1.2 Les parois opaques .....	18
1.2.1 Les constructions maçonnées .....	19
1.2.2 Les constructions en bois .....	20
1.3 Les isolants.....	22
1.3.1 Les isolants naturels .....	22
1.3.2 Les isolants synthétiques.....	23
1.3.3 Les isolants minéraux .....	24
1.4 Les ponts thermiques .....	25
1.5 Les fenêtres .....	27
1.5.1 Le vitrage .....	28
1.5.2 Cadre et châssis de fenêtre .....	31
1.6 L'étanchéité à l'air .....	32
1.7 La ventilation .....	34
Chapitre 2.....	36
Méthode de calcul des déperditions, confort thermique et bilan énergétique.....	36
2.1 Notions fondamentaux de thermique.....	36
2.1.1 Flux de chaleur ou transfert de chaleur .....	36
2.1.2 La conduction .....	36
2.1.3 La convection.....	37
2.1.4 Le rayonnement .....	38
2.2 Le confort thermique.....	40
2.3 Calcul des besoins énergétiques .....	43
2.3.1 Les déperditions de chaleur .....	44

2.3.2	Les apports de chaleur .....	48
2.3.3	Détail des déperditions par les surfaces vitrées.....	49
2.4	Le bilan énergétique.....	54
2.5	De l'énergie primaire à l'énergie finale .....	55
2.6	Du régime permanent au régime dynamique .....	56
Chapitre 3.....		58
Étude d'une maison passive : .....		58
site, climat et données de modélisation.....		58
3.1	Site et climat.....	58
3.2	Modélisation.....	62
3.2.1	Géométrie.....	62
3.3	Performances minimales d'une maison passive .....	63
3.3.1	Système de ventilation et débits d'air.....	64
3.3.2	Infiltration.....	66
3.3.3	Les murs.....	67
3.3.4	Les fenêtres .....	70
3.4	Méthodologie de calcul .....	74
3.5	Paramètres communs à tous les modèles.....	76
3.6	Paramètres du modèle de Base.....	77
3.6.1	Détail des résultats.....	77
3.6.2	Confort d'été : analyse des échanges thermique à travers l'enveloppe.....	79
3.6.3	Comparatif de l'ensemble des pertes /déperditions des chambres .....	82
3.6.4	Premiers résultats et premiers constats .....	83
3.6.5	Proposition d'une solution « active ».....	84
Chapitre 4.....		88
Optimisation de l'enveloppe.....		88
4.1	Optimisation des parois vitrées.....	88
4.1.1	Pourcentage de façade vitrée et typologie des vitres modélisées.....	88
4.1.2	Les apports solaires absorbés.....	89
4.1.3	Besoins en chauffage.....	90
4.1.4	Étude du confort.....	92
4.1.5	Consommation totale d'énergie.....	94
4.1.6	Résultats et analyse.....	97
4.2	Étude des masques solaires.....	99

4.2.1	Course du soleil .....	99
4.2.2	Masque solaire façade sud : séjour/cuisine .....	100
4.2.3	Masques solaires pignons Est et Ouest .....	102
4.2.4	Résultats et analyse .....	105
4.3	Optimisation des murs .....	107
4.3.1	Rappel de la typologie des murs .....	107
4.3.2	Charge de chauffage.....	109
4.3.3	Façade sud.....	110
4.3.4	Le confort .....	112
4.3.5	Consommation totale d'énergie.....	113
4.3.6	Résultat finaux et analyse du confort.....	114
	Conclusion.....	116



## Avant-propos

Ce mémoire provient d'un double constat. Le premier constat découle du mode de calcul des maisons passives mêmes, pour satisfaire les critères de labélisation Passivhaus. Le calcul des consommations énergétiques se fait sur une feuille de calculs issus d'un tableur. Cette méthode est peut être satisfaisante pour dresser un portrait large des besoins énergétiques d'une maison, mais cette même labélisation recommande un calcul dynamique pour avoir un chiffrage plus précis, ce type de calcul est rarement menée. Le niveau de détail requis pour mener à bien ce type de calcul va au-delà du contenu d'un simple tableur.

Le deuxième constat découle du premier. Si nous menons un calcul dynamique, quelles informations sont pertinentes pour les besoins de modélisation ? L'utilisation d'un calcul dynamique implique une méthodologie de quantification, mais justement, la question importante, quelle méthodologie adopter pour tirer profit de la précision de ce type de calcul ?

Nous allons répondre à ces questions à travers cet exposé, comment procéder, quel niveau de détail, quel méthodologie adopter. Mais surtout, ce mémoire est le fruit d'un travail qui commença en 1997 et qui fut marqué par des rencontres aussi bien dans le milieu professionnel que parmi les scientifiques du bâtiment.



## Résumé

Nous avons divisé ce rapport en quatre parties distinctes. Nous débutons une première partie dédiée à la conception des maisons passives, ce qui nous permet d'aborder en seconde instance le calcul des déperditions, le confort thermique et le bilan énergétique. À partir de ces bases nous pouvons aborder, dans un troisième temps, l'étude d'une maison passive avec l'outil de simulation dynamique.

Cette étude porte dans un tout premier temps sur les caractéristiques d'un bâtiment passif et ses détails de conception. Quand nous parlons d'une maison ou bâtiment dit « passif », nous évoquons un type de construction qui est le fruit de plusieurs décennies de collaboration entre scientifiques et professionnels du bâtiment. L'importance de chaque composant est soulignée et leur interaction dans une enveloppe finie est mise en évidence. Nous abordons les différents types de parois opaques proposés sur le marché, les isolants, la problématique des ponts thermiques, l'ensemble composant une fenêtre, l'étanchéité à l'air et la ventilation. Ceci nous sert de base pour aborder les principes de calcul.

Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes de calcul réglementaires adoptées pour l'estimation des maisons passives. La méthode décrite est celle utilisée à l'échelle Européenne et nous permet de mieux appréhender la complexité des échanges thermiques qui ont lieu dans un bâtiment. Une maison passive est non seulement une maison économe en énergie mais une maison où le confort thermique est tout aussi important et ce tout au long de l'année. Nous allons donc reprendre les notions de bases réglementaires du confort thermique telles qu'elles doivent être appliquées pour être conformes aux règles de l'art d'une maison passive.

Nous avons étudié les bases matérielles (éléments de construction), les bases physiques du calcul et de la notion de confort. Nous abordons en troisième chapitre le modèle de base. Ce que nous appelons le modèle de base est l'étalon mesure en quelque sorte de nos calculs. Nous définissons et appliquons sur un modèle informatique les propriétés minima à respecter pour une maison passive, et les résultats obtenus nous serviront de référence pour valider les choix d'optimisation. Nous terminons ce chapitre sur la méthodologie à adopter pour notre étude ainsi qu'une première analyse des résultats obtenus, ceci nous permet d'aborder l'optimisation même.

Le dernier chapitre aborde l'optimisation même de l'enveloppe d'un bâtiment passif. La méthode consiste à approcher une optimisation des parois vitrées en premier car il s'agit de l'élément de l'enveloppe du bâtiment qui aura le plus d'influence sur les consommations énergétiques et le confort thermique.

Le dernier composant de l'enveloppe de notre étude d'optimisation est les parois opaques, ceci nous permet d'avoir nos premières conclusions sur les résultats. Nous concluons notre étude sur une ouverture de l'utilisation de la simulation dynamique elle-même, les limites et possibilités offertes par l'utilisation d'un tel outil.



## Introduction

Les pays de la Communauté Européenne se fixent 5 objectifs majeurs pour l'année 2020 dont notamment une cible qui oriente les objectifs traitant du changement climatique et le développement durable. Ces objectifs sont :

- La Réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20% (voire de 30%, si les conditions le permettent) par rapport à 2012
- L'Utilisation d'énergie provenant de sources renouvelables à hauteur de 20%
- L'Augmentation de 20% de l'efficacité énergétique

Ceci a été transposé en France par des objectifs nationaux:

- La Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 14%
- La Part d'énergies renouvelables de 23%
- La Réduction de la consommation énergétique (efficacité énergétique) de 34 Mtep.

La question se pose alors de savoir : comment traduire l'efficacité énergétique au niveau du bâtiment ? Nous parlons alors d'un bâtiment qui utilise de manière rationnelle et contrôlée l'énergie pour subvenir aux besoins de confort des occupants. Ce bâtiment, de par sa conception et l'utilisation des sources renouvelables sera énergétiquement efficace par rapport à un bâtiment dit traditionnel.

Ceci s'est traduit par un accord le 17 Novembre 2009 entre le Parlement Européen et le Conseil des Ministres sur une directive « Efficacité Énergétique des Bâtiments ». Le texte fixe un objectif majeur : tous les bâtiments neufs devront être proches du « zéro énergie ».

Il conviendrait de préciser qu'un bâtiment dit « zéro énergie » n'est surtout pas uniquement un bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme. Il ne s'agit pas de palier les lacunes d'un bâtiment énergivore par une grande surface de panneaux photovoltaïques ou une centrale de cogénération efficace. Il est absurde de vouloir rendre indépendant en énergie un bâtiment qui n'est pas énergétiquement efficace, d'où le sujet de notre étude.

Les termes de maisons bioclimatiques, ou solaires, voir hybride et encore passive sont familiers et désignent des constructions qui ont tous la même volonté de réduire de manière rationnelle et contrôlée l'impact énergétique des constructions. Cette typologie de construction n'est pas nouvelle et représente le fruit de la recherche et collaboration entre des scientifiques, professionnels du bâtiment et fabricants depuis plus de 40 ans.

Ce que nous appelons une maison passive ou passivhaus est avant tout un guide de conception bien déterminée, reconnu par un label professionnel et qui représente le type de bâtiment le plus efficace énergétiquement aujourd'hui, l'étalon de mesure en quelque sorte des bâtiments à venir.

Une maison passive est conçue dans l'optique d'utiliser l'énergie de la manière la plus efficace possible pour offrir le confort optimal aux occupants. La conception prend en compte les apports solaires à travers les baies vitrées, offrant la lumière, le confort et des apports gratuits pour les besoins de chauffage. L'isolation en est optimisée pour limiter au maximum les déperditions et les systèmes mécaniques (actifs) ne consomment que très peu d'énergie. Une maison passive, de par la conception de son enveloppe et des systèmes actifs, consomme jusqu'à 80 % d'énergie en moins qu'un bâtiment traditionnel.

La réduction de la consommation énergétique et le confort des bâtiments est un sujet qui a été abordé en 1973 avec la construction du « DTU Zero Energy House » par l'équipe du Prof. Vagn KORSGAARD à Copenhague au Danemark, (Figure 1). L'approche scientifique de la conception par simulation thermique dynamique et l'étude détaillée des composants de l'enveloppe en amont ont permis de réaliser un tel bâtiment. Cette maison fait référence dans le domaine et d'autres projets suivront, tous motivés par les mêmes buts : minimiser l'impact énergétique du bâtiment et l'optimisation du confort thermique..

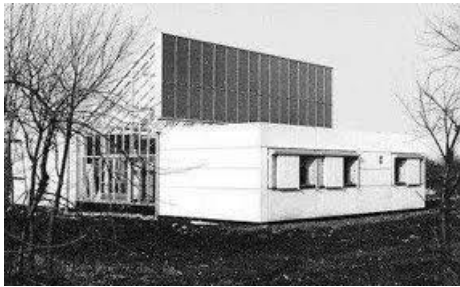


Figure 1 : DTU Zero Energy House- Prof. Vagn Korsgaard, Copenhague, Danemark.

C'est en 1974 que fut fondé l'IEA<sup>2</sup> qui a pour but de promouvoir la recherche et le développement des sources alternatives d'énergie et de réduire la dépendance aux énergies fossiles. Le travail est divisé en groupes de recherche dont notamment le « Task VIII <sup>i</sup> : Bâtiments Basse Consommation d'Énergie Passives et Hybride Solaire », recherche qui fut menée de 1982 à 1988.

Ces recherches se poursuivent en Europe notamment en Allemagne<sup>ii</sup> et aux États Unis<sup>iii</sup> sur les mêmes principes. Les outils informatiques sont utilisés en amont afin d'optimiser la conception des bâtiments. Toutes ces initiatives ont contribué à une base de connaissances et d'informations sur les maisons économes en énergie qui servira pour les constructions à venir

Les scientifiques rendent les premières conclusions sur ces bâtiments pionniers et les constats suivants sont faits :

- l'importance d'une enveloppe étanche à l'air,
- une conception de la structure sans ponts thermiques besoin de fenêtres hautement performantes
- la nécessité d'avoir des éléments techniques (ventilation, solaire, récupération d'énergie) simples et surs.

---

<sup>2</sup> International Energy Agency

Les premières maisons passives sont construites en 1990/91 et sont le résultat d'une coopération internationale entre scientifiques, menée par l'équipe de B. Adamson et G. Hauser. Le « Passive House Preparatory Project » établira en amont la conception de l'enveloppe et des systèmes de ventilation : réduction des ponts thermiques, fenêtres à l'isolation accrue et ventilation asservi aux taux de CO. Beaucoup d'éléments sont construits sur mesure et les participants se rendent compte de l'importance des matériaux constructifs de qualité construits en usine et que leur développement sera une des clefs pour la réussite à venir des maisons passives



Figure 2 : Premières maisons passives- Architectes: Prof. Bott / Ridder /Westermeyer

C'est une série de 4 maisons jointes qui sont construits (Figure 2) et qui restent toujours occupés aujourd'hui, témoins de leur succès. Les besoins en chauffage sont seulement de 10 kWh/m<sup>2</sup> annuel avec des économies totales d'énergie correspondant à 90% par rapport aux autres bâtiments du même type. Les fondamentaux des bâtiments passifs sont ainsi posés à travers cette collaboration entre scientifiques<sup>iv</sup>.

Depuis ces premières réalisations et les constats des besoins de produits de qualité fabriqués en série les industriels nous proposent un éventail de produits performants qui répondent aux besoins des constructions énergétiquement efficaces :

- Un triple vitrage (voir quadruple) peut être produit et les performances optiques seront garanties par le fabricant.
- Des isolants de plus en plus performants sont proposés
- Des produits de mise en étanchéité à l'air
- Des systèmes de chauffage efficaces et peu énergivores

Nous avons aussi des outils d'étude et d'analyse qui ont fait leurs preuves, ces outils ayant suivi la même évolution que les maisons passives, et aujourd'hui nous pouvons effectivement constater que nous ne sommes plus dans le domaine de la recherche scientifique mais dans la diffusion du savoir-faire acquis par ses années de travail.

Plus de 20 000 maisons passives ont été construites à ce jour et souvent ces concepts sont intégrés dans des normes ou recommandations nationales. La Figure 3 nous donne deux exemples de maisons passives contemporaines. La maison dite passive est devenue une référence du genre et le modèle s'étend à travers les pays Européens notamment ceux du Nord et on s'intéresse de très près aux climats méditerranéens. C'est effectivement un modèle qui s'adapte à tout type de bâtiment (maisons individuelles, collectifs, bureaux, écoles) car on propose non seulement des économies d'énergie substantielles mais on propose aussi un réel confort thermique.

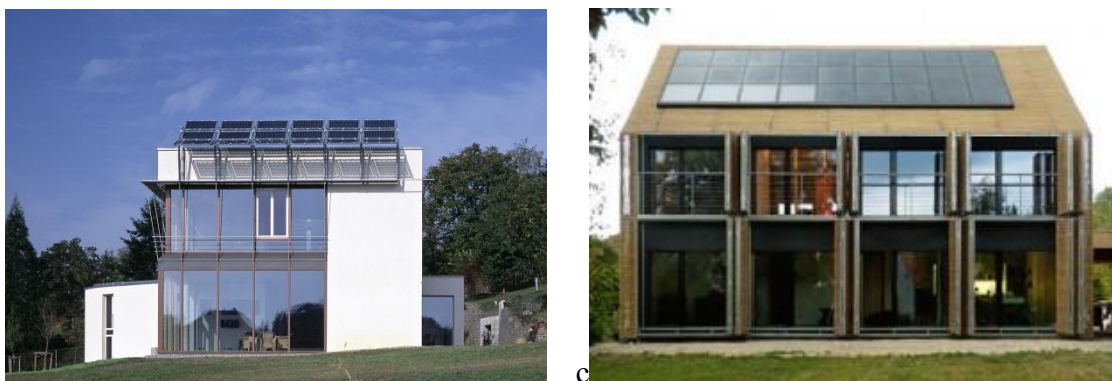


Figure 3 : Maisons Passives contemporaines. À droite une maison construite 2006 et gauche une maison achevée en 2009 (Interpane, Karawitz Architecture).

L'IEA est maintenant au stade d'étude et de développement des maisons dites « Énergie Positive », c'est-à-dire des bâtiments qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment sur place. La normalisation Française suit de très près et proposera pour sa version RT 2020 des bâtiments à énergie positive (BEPOS) comme standard pour les maisons neuves.

Les scientifiques qui ont conçu les premières maisons passives se sont rapidement rendu compte qu'une évolution des méthodes de calcul était nécessaire aussi, les outils de calcul n'étaient pas adaptés. On s'est ainsi non seulement rendu compte que les techniques et les éléments de construction (triple vitrage, isolants renforcés...) devaient évoluer pour pouvoir répondre à ces exigences mais les méthodes et moyens de calcul devaient aussi évoluer pour pouvoir tenir compte de la complexité de la thermique du bâtiment. Il faut pouvoir prendre en compte les échanges complexes du bâtiment avec son environnement immédiat (climat, ombres portées, pression atmosphérique etc.), les échanges à travers l'enveloppe, les systèmes de ventilation, la prise en compte et la prédiction du confort des occupants. Des outils adaptés devaient être créés pour pouvoir répondre à cette demande et la simulation thermique dynamique est une des réponses à la complexité des calculs demandés.

La simulation thermique dynamique s'est imposée comme l'outil de calcul de prédilection pour estimer les performances d'un bâtiment, ce type de calcul permettant de prendre en compte un nombre important de paramètres (vent, pression, température, humidité ambiante, échanges avec le sol, rayonnement solaire, diffusion de la chaleur etc. ...). La complexité provient aussi bien du nombre de paramètres pris en compte que des différents types de calculs nécessaires et cela est devenu possible grâce à l'utilisation de la micro-informatique et la puissance de calcul croissante des ordinateurs de bureau.

Ce mémoire d'ingénieur propose à travers l'utilisation d'un outil de simulation thermique dynamique, EnergyPlus, l'optimisation de l'enveloppe d'un bâtiment passif. Nous allons nous servir de cette méthode de calcul pour optimiser le choix des composants de l'enveloppe. Nous vous proposons de suivre la trame suivant :

- Typologies constructives contemporaines des Maisons Passives.
- Méthodes de calcul des déperditions et le Bilan Thermique
- Climat, Données de modélisation
- Simulation dynamique et d'Optimisation



# Chapitre 1

## Conception d'une maison passive

Le terme « passif » évoque une maison qui n'a pas besoin d'énergie pour assurer les besoins de chauffage, c'est-à-dire qu'elle est conçue de telle manière à profiter au maximum des apports gratuits (soleil, apports internes) et à limiter les déperditions.. Nous allons voir à travers ce chapitre en quoi la construction d'une maison passive est différente des autres types de construction et les différents types de produits proposés par les fabricants qui répondent aux critères exigeants.

C'est l'enveloppe du bâtiment qui protège les occupants des variations climatiques et par la même occasion apporte le confort visuel à travers les vitrages. La Figure 4 nous montre une maison passive avec une ossature en bois en cours d'assemblage sur le chantier. Les maisons passives, de par leur conception, se prêtent à des assemblages et des composants différents d'une construction plus « traditionnelle », mais surtout à une préfabrication en atelier pour pouvoir mieux contrôler la qualité de la construction et assurer une meilleure continuité de l'enveloppe.



Figure 4 : Assemblage sur chantier d'éléments préassemblés en atelier.

## 1.1 Les principes d'une conception passive

Dans un bâtiment passif, il est essentiel de ne pas avoir de rupture de l'isolation, en ce sens que la conception doit proposer une frontière continue et sans interruption au climat extérieur, limitant ainsi les déperditions thermiques. La Figure 5 est une bonne illustration de continuité, nous pouvons tracer une ligne en continu et ce sans lever le crayon tout en suivant le contour de l'isolant, Figure 5.

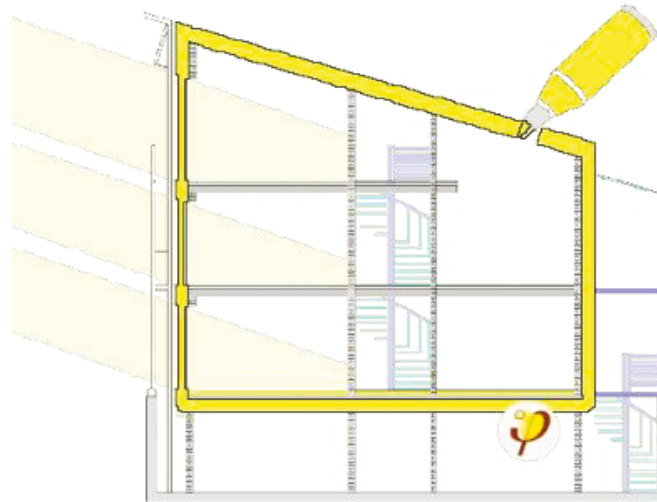


Figure 5 : Principe de l'isolation sans rupture d'une maison Passive (iPHA <sup>v</sup>).

C'est justement aux jonctions mur/plancher où la conception joue un rôle clef dans la continuité de l'isolant. Ci-dessous nous avons l'illustration <sup>vi</sup> du traitement d'une liaison plancher/soubassement dans une maison passive. On peut remarquer la continuité de l'isolant entre la dalle, le mur et le mur de soubassement. Cette conception évite la formation d'un pont thermique, ceci est un des fondamentaux des maisons passives

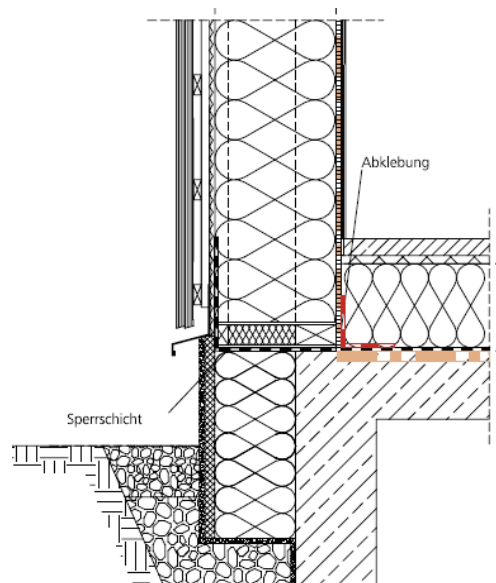


Figure 6 : Détail d'une conception sans ponts thermiques d'une maison passive.

Plus l'enveloppe du bâtiment devient performante et étanche à l'air, plus les détails de jonction deviennent importants. Une mauvaise conception de ces jonctions peut entraîner des pertes énergétiques significatives et engendrer de la condensation sur la surface voir même des moisissures à long terme. Nous allons aborder dans un premier temps les types de murs propices à une construction passive avant d'aborder les ponts thermiques.

## 1.2 Les parois opaques

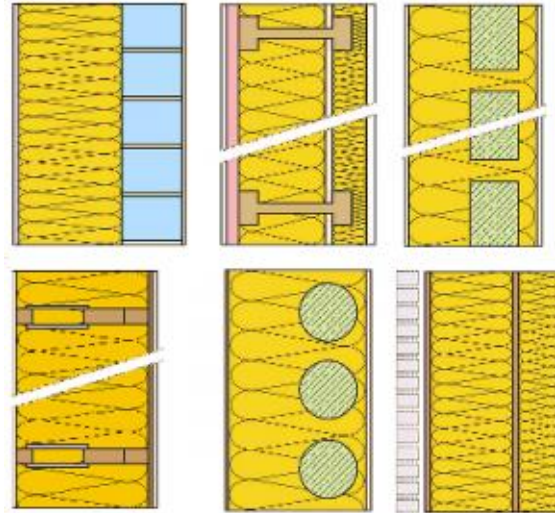


Figure 7: Typologie des murs types des maisons passives (InPH)

Les parois opaques (murs, toitures et planchers) d'un bâtiment passif ont la double fonction d'apporter la rigidité à l'édifice et d'être le support de l'isolation.

Ces parois offrent une protection accrue du froid/chaud par une isolation plus importante par rapport à une maison traditionnelle. Cette protection est présentée par la résistance thermique totale d'une paroi. La Figure 7 est une illustration des typologies des parois opaques couramment adoptées dans la construction des maisons passives.

La norme ISO 6946<sup>vii</sup> définit la résistance thermique totale d'une paroi composée de couches thermiquement homogènes perpendiculaires au flux de chaleur comme étant la somme de la résistance de ses composants et des résistances superficielles de telle manière que :

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 \dots \dots + R_n + R_{se}$$

Dans ce travail, nous étudions deux types de mur qui se distinguent par leurs propriétés physiques et leur mise en œuvre :

- Les constructions maçonnées.
- Les constructions en bois et dérivées de bois

Ces deux types de murs se prêtent aisément, soit à une préfabrication en composants simples ou à un pré assemblage en atelier. Ceci permet un meilleur contrôle de la qualité des produits mis en œuvre et donc la garantie d'un produit final qui pourra répondre aux demandes exigeants d'une construction passive..

### 1.2.1 Les constructions maçonnées

Il s'agit d'un mur massif composé d'un élément porteur et d'une isolation intérieure ou extérieure. On distingue essentiellement des murs en blocs de béton cellulaire et des briques en terre cuite.

Les fabricants proposent sur le marché des composants performants qui sont adaptés à l'utilisation dans la construction d'une maison passive. Ce sont des composants qui sont issus de la filière traditionnelle de construction et qui peuvent être facilement mis en œuvre. La terre cuite offre l'avantage d'être un matériau plus respectueux de l'environnement et le béton cellulaire offre l'avantage d'avoir une plus grande résistance au flux thermique. Les deux types de mur requièrent tout même un isolant supplémentaire pour pouvoir atteindre les niveaux de résistance thermique requis pour une maison passive.

Le béton cellulaire est un matériau dont la fabrication est à base de chaux vive, de ciment pur, de sable et d'eau. Contrairement à un béton coulé in situ, il est issu d'un procédé industriel. Ce qui rend ce type de béton intéressant pour l'utilisation dans des constructions passives est le fait que lors de sa fabrication, le mélange est allégé en produisant de l'hydrogène gazeux, ceci permet le gonflement du mortier et crée des bulles d'air, ces derniers restent dans la masse après cuisson. Ce mélange est ensuite cuit dans des moules à des températures avoisinant les 180 °C. À la fin du processus, les briques sont démoulées puis taillées ou sciées aux dimensions requis.

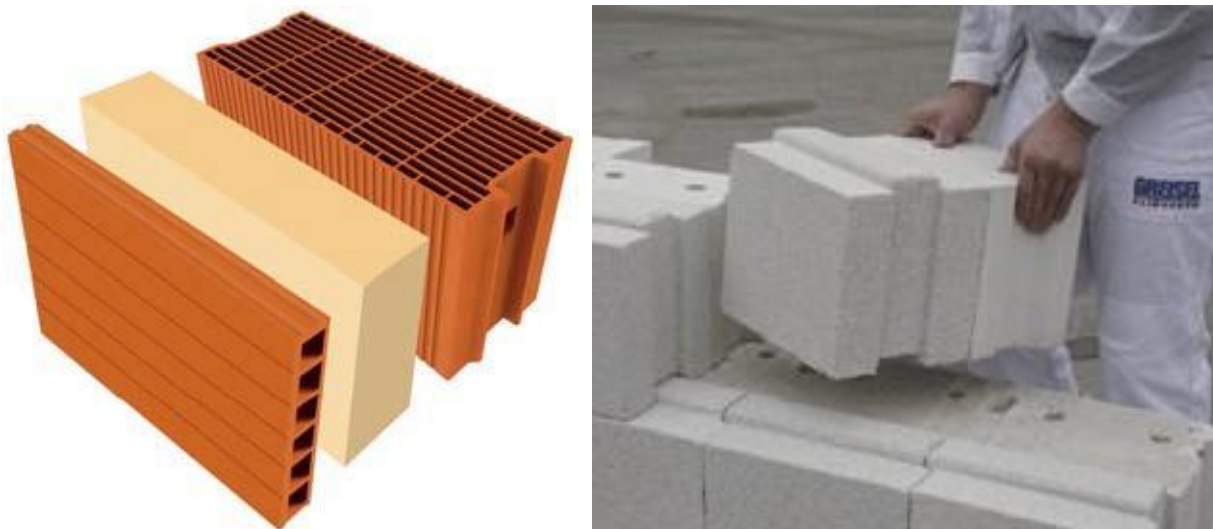


Figure 8 : A droite, un mur en terre cuite (Bouyer Leroux) et à gauche un mur en béton cellulaire avec isolant incorporé (système Twinstone de Griesel Klimanorm).

La terre cuite est fabriquée directement avec un matériau naturel, l'argile. La terre est broyée, malaxée et de l'eau est rajoutée pour obtenir une pâte. Cette pâte est extrudée et coupée pour former des briques qui seront séchées puis cuites pour former les briques.

Les avantages des constructions maçonnées sont :

- Le matériau agit en tant que régulateur thermique, en offrant une plus grande masse volumique (forte inertie thermique) stockant dans sa masse les calories

excédentaires pour les restituer plus tard (déphasage). Ceci permet de limiter les périodes de surchauffe en été, car l'inertie de la paroi offre une protection supplémentaire.

- Structurellement très résistantes par rapport à d'autres types de construction.

Les inconvénients des constructions maçonnées sont :

- Le mur maçonné est poreux (béton cellulaire ou terre cuite) et l'étanchéité à l'air doit être assurée par un enduit intérieur, ou par un isolant extérieur afin d'offrir une grande résistance au transport de vapeur d'eau.
- Les problèmes de ponts thermiques au niveau des angles et de la structure que nous abordons plus loin dans ce chapitre.
- Le temps de mise en œuvre est plus long que d'autres systèmes et donc le temps avant la mise hors eau du bâtiment sera plus long (problème d'intempéries).

### 1.2.2 Les constructions en bois

Une conception en bois offre des avantages lorsque nous considérons le cycle de vie du matériau mis en œuvre. Le bois de construction est un matériau naturel qui provient principalement de sources gérées durablement (gestion de la ressource et renouvellement des bois abattus). De même pour les panneaux de particules utilisées qui sont le plus souvent des produits issus de la transformation du bois ce qui renforce la gestion durable. Il en résulte un ensemble très attrayant pour une conception passive, durable et écologique, un argument de poids pour certains Maîtres d'Ouvrage.

Ce mode de construction, qui nous vient des pays du Nord et de l'Est de l'Europe, est simple et permet une meilleure étanchéité à l'air de l'assemblage (ceci est un point primordial est nous allons revenir dessus).

En France, le marché du bois dans la construction est estimé à 10% du part de marché de la construction, donc très peu utilisé. Il s'agit d'une filière dont les pouvoirs publics souhaitent encourager notamment grâce à la création du label « bâtiment biosourcé<sup>viii</sup> ».

Les constructions en bois se différencient des constructions maçonnées de par le fait que des pans entiers de mur peuvent être pré-assemblés en atelier (y compris les réservations pour les câbles, conduits et fenêtres) pour être livrés et assemblés par grue sur place. La structure bois massif des régions montagneuses a bien évolué et propose actuellement des systèmes de construction tout à fait adaptés aux besoins d'une habitation passive. La structure d'une maison peut ainsi se monter en une journée. La Figure 9 nous montre des exemples de mises en place de systèmes de construction en bois et la mise en place sur chantier.

Cette technique permet une standardisation des éléments qui sont facilement assemblés en murs entiers en atelier, ce qui permettra donc un gain de temps non négligeable sur le chantier car les différents éléments sont grutés sur place pour un assemblage rapide, nous parlons de l'ordre de quelques jours pour une maison standard. Le bâtiment est rapidement mis hors eau ce qui représente un avantage non négligeable.

Les avantages d'une construction en bois sont :

- La fabrication en atelier pour être assemblée sur chantier. Ceci permet un meilleur contrôle de qualité et un assemblage sur site plus rapide.
- La grande étanchéité à l'air
- Ils sont issus d'une filière durable, soit utilisations de déchets de bois pour des panneaux de particules soit issus de forêts gérés durablement.

Les inconvénients de la construction en bois sont :

- La faible inertie du matériau qui n'offre pas de protection contre les variations de température. Une étude spécifique devra être menée pour le confort d'été.
- Le risque de niveaux élevés de COV dans les colles utilisées dans la fabrication.
- Une attention toute particulière lors du stockage sur chantier doit être apportée. Les éléments doivent être tenus au sec et à l'abri de la pluie car toute humidité sera refermée dans une enveloppe étanche.



Figure 9 : Systèmes de construction en bois. En haut, système en bois massif laminé. En bas, système de poutrelles ajourées en I (Novatop et Steico).

## 1.3 Les isolants

Un isolant thermique est un matériau conçu pour limiter les transferts de chaleur. Il forme une barrière contre les fluctuations de température et apporte ainsi le confort aux occupants d'une maison passive.

Nous pouvons distinguer trois grandes catégories d'isolant sur le marché :

- Les isolants naturels (chanvre, fibres de bois, etc.).
- Les isolants synthétiques (polystyrène, polyuréthane, etc.).
- Les isolants minéraux (laine de verre, laine de roche, vermiculite, etc.).

Il est intéressant de noter que les isolants synthétiques ont des résistances thermiques plus grandes par rapport aux isolants issus de dérivées de produits naturels. C'est un choix du prescripteur/maitre d'œuvre de prescrire un isolant naturel ou non. Quand nous évoquons une maison économe en énergie, nous pensons également à l'impact écologique des matériaux mis en œuvre et nous avons tendance à nous méfier des procédés chimiques industriels par rapport au procédés dits « naturels », mais il faut savoir que les produits issus de chaînes purement industrielles sont certifiés et suivent un contrôle systématique et régulier, de la fabrication jusqu'à leur fin de vie.

### 1.3.1 Les isolants naturels

Les isolants naturels sont la réponse à une demande de produits qui ont un faible impact sur l'environnement, de la fabrication du produit jusqu'au recyclage en fin de vie. Les premiers isolants naturels étaient des matériaux comme la laine de mouton, le liège ou la paille mais les fabricants nous proposent des matériaux bien plus intéressants aujourd'hui (homogènes, absence d'odeurs, contrôle de qualité) et de mise en œuvre plus facile, (quelques exemples dans la Figure 10 ci-dessous). Voici une liste, non exhaustive, de quelques produits sur le marché :

- Ouate de cellulose
- Lin
- Fibre de chanvre
- Fibre de bois
- Les avantages des isolants naturels sont :
  - Les produits fabriqués de ressources naturellement renouvelables (bois issus de forêts gérées durablement, agriculture rationnelle, etc.).
  - La plupart sont fongicides et antibactériens.
  - Ils offrent une inertie thermique, renforce le confort en évitant les variations brusques de température.
- Les inconvénients des isolants naturels sont :
  - Une résistance thermique plus faible que d'autres isolants. Ainsi, pour une isolation égale une plus grande épaisseur est requise.

- Une faible résistance à la compression et donc ne peut être utilisée en isolation sous dalle.
- Le lin n'est pas toujours écologique, faire attention aux composants de ce dernier.



Figure 10 : Isolants naturels, Fibre de bois sous forme de panneaux, et fibres de chanvre et/ou lin sous forme de rouleaux (Isonat).

### 1.3.2 Les isolants synthétiques

Les isolants synthétiques sont des produits dérivés de l'industrie pétrolière et issus de transformations chimiques. Par exemple le polystyrène extrudé est fabriqué à partir de billes de monomère styrène mélangées et extrudées avec un agent gonflant (CO<sub>2</sub> ou HFC) suivant les besoins. Les isolants synthétiques sont classés suivant leur composition chimique. La Figure 11 nous montre les formes les plus courantes d'isolants synthétiques que nous rencontrons sur les chantiers de bâtiment, et leur aptitude à prendre toutes les formes possibles en font un choix attractif.



Figure 11 : Panneaux XPS et utilisation de blocs modulables de XPS en isolation sous dalle en coffrage perdu (Dow Corning et Jackodur).



Les classes d'isolants synthétiques sont :

- la gamme de polystyrènes expansés PSE ou extrudés XPS
  - le polyuréthane PIR,
  - le polyisocyanurate PIR
  - les phénoliques
- Les avantages des isolants synthétiques sont :
- La résistance à la compression et donc peuvent servir d'isolant sous dalle.
  - Ce sont des isolants les plus performants sur le marché (faible coefficient  $\lambda$ ).
  - Ce sont des produits stables, inertes, imputrescibles.
  - Ils ont la facilité de mise en œuvre.
  - Ils se prêtent à toutes les formes possibles.
- Leurs inconvénients sont :
- Ils sont issus du milieu pétrochimique.
  - Ce sont des matériaux qui ne respirent pas (cela peut être un avantage si correctement mis en œuvre, une attention toute particulière doit être prêtée aux détails constructifs).

### 1.3.3 Les isolants minéraux

Les isolants minéraux sont sous trois formes principales :

- Les rouleaux (la laine de verre et la laine de roche), isolation des façades et toitures.
- Les panneaux (essentiellement sous forme de verre recyclé), isolation sous dalle.
- Les billes/granulats, ce sont les minéraux concassés/expansés, la vermiculite et la perlite qui sont souvent incorporés dans le béton ou les chapes pour renforcer l'isolation (ce que nous appelons couramment des bétons légers).

Les isolants minéraux sous forme de rouleaux sont les types les plus répandus dans le domaine du bâtiment, la Figure 12 nous montre les formes les plus usuelles (rouleaux, panneaux ou sous forme de granulats).

La laine de verre est fabriquée à partir de sable naturel auquel on ajoute des fondants ainsi que d'autres produits verriers issus du recyclage. La matière est fondue à haute température (1400 °C) dans un four puis est transformée en fibres. A partir de ces fibres, un matelas fibreux est créé pour former le rouleau d'isolant. La laine de roche suit le même processus mais sa matière première est le basalte ou le laitier de hauts fourneaux.

Les avantages des isolants minéraux sont :

- Des excellents niveaux d'isolation atteints et une bonne isolation acoustique.
- Ils sont naturellement incombustibles.
- En général, ce sont les isolants les moins chers sur le marché (sous forme de rouleaux)



Figure 12: Quelques exemples d'isolants minéraux, verre cellulaire et vermiculite (Foamglass et Fermacell).

Leurs inconvénients sont :

- Les fibres sont irritantes pour la peau et la gorge et des précautions doivent être prises lors de la pose.
- Les rouleaux se tassent lentement et perdent de leur performance thermique.
- A l'inverse des rouleaux, les isolants sous forme des panneaux sont un choix relativement coûteux.

## 1.4 Les ponts thermiques

Un bâtiment forme un système d'échange complexe avec son environnement. Cet échange se traduit sous la forme de flux de chaleur. Le flux prend un sens ou une direction et ce sera toujours dans le sens du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Il est également important de remarquer que ce flux prendra toujours le chemin de moindre résistance, *et c'est cet acheminement du flux que nous appelons un pont thermique en bâtiment*. Ces ponts thermiques se situent à la jonction des matériaux et aux changements de direction de l'enveloppe, nous devons insister sur l'importance de l'étude des détails de construction lors de la phase de conception d'un bâtiment.

Une maison passive est considérée comme une construction n'ayant pas de ponts thermiques et ce grâce à une excellente conception des jonctions entre les différents matériaux et parois (sols/murs, murs/plafonds ...). Chaque détail constructif doit être étudié de manière à augmenter la résistance au flux thermique.

Pour valider tout détail de conception nous devons effectuer un calcul bi dimensionnel détaillé de la jonction sur un logiciel aux éléments finis adapté. Le détail du calcul ne rentre pas dans les limites de ce mémoire mai se présente sous la forme de l'équation suivante<sup>ix</sup> :

$$\psi = (L_1^{2D} - h_w U_w) - L_2^{2D}$$

La Figure 13 ci-dessous est une image du flux de chaleur extrait d'un tel calcul. Nous avons l'exemple type d'un détail de liaison plancher/mur sur une dalle en béton. L'image à gauche est celle d'une conception que nous allons qualifier de « traditionnel ». Nous pouvons remarquer le flux de chaleur qui traverse l'enveloppe et qui s'achemine directement vers le sol avec le sol (chemin de moindre résistance). La figure à droite est le même détail constructif mais conçu pour une maison passive. Nous remarquons l'absence de pont

thermique car le flux est effectivement bloqué, nous n'avons plus d'échange avec le sol et ce grâce à une étude détaillée en amont de la conception de l'enveloppe du bâtiment.

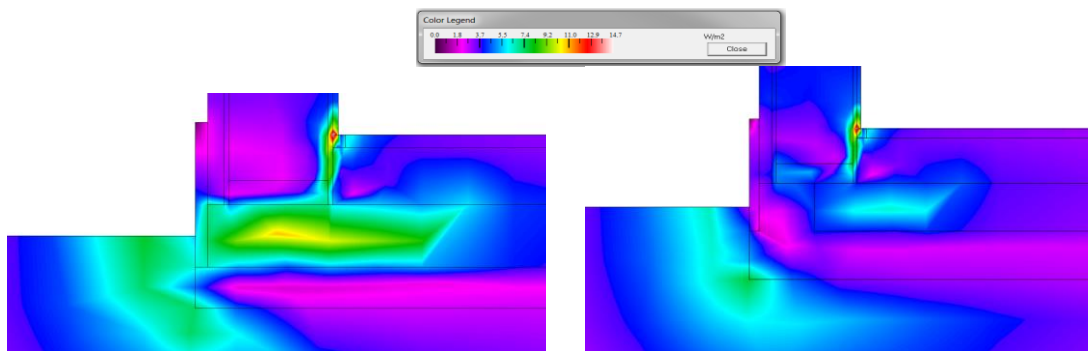


Figure 13: Comparaison d'un détail de liaison dalle de plancher et sol. En haut nous avons une conception « traditionnelle » et en bas nous avons le même détail mais conçu pour une maison passive.

Les ponts thermiques se forment toujours à la jonction de deux matériaux (compositions et propriétés thermiques différentes) et aux changements de direction dans la structure (modification du sens du flux), comme nous pouvons le voir sur la Figure 14.

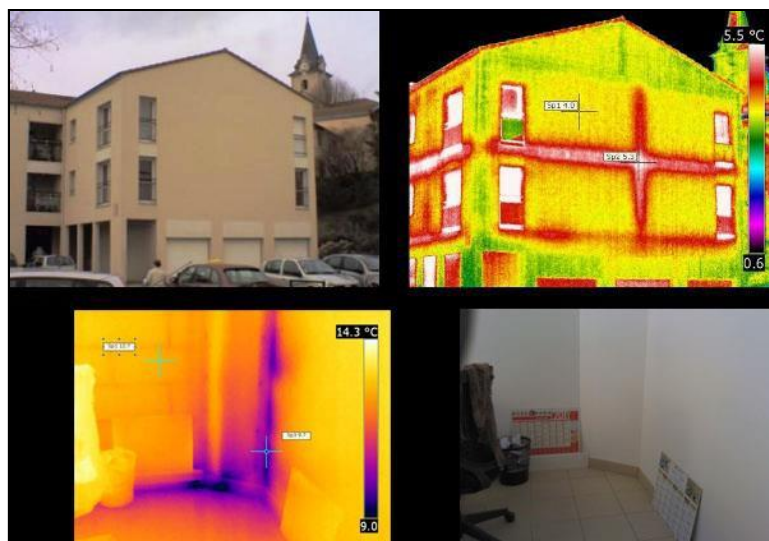


Figure 14 : Ponts thermiques de liaison visibles avec une caméra infrarouge (CCTA).

Pour résumer, nous pouvons dire que les effets négatifs des ponts thermiques sur l'enveloppe d'un bâtiment sont les suivants :

- Ils influencent directement la température superficielle des parois, et dans le pire des cas cela peut entraîner la condensation et la formation de moisissures, ceci a un impact négatif sur la santé des occupants et peut, à long terme, provoquer des maladies respiratoires.

- Ils entraînent la modification (dégradation) des pertes de chaleur et de la consommation énergétique du bâtiment, et celui-ci consommera plus pour pouvoir conserver un confort thermique acceptable. Ces dégradations ne sont pas visibles dans un premier temps et il est souvent très difficile et onéreux de reprendre des défauts de conception lorsque le constat visuel est fait et les dégradations constatées.

## 1.5 Les fenêtres

Ce sont les fenêtres qui ont vu le plus de progrès techniques depuis les premières maisons passives où les fabricants ont dû apporter des solutions sur mesure pour pouvoir atteindre les niveaux de performances requis par les concepteurs. Un des premiers constats importants était que l'enveloppe performante d'un bâtiment doit également inclure des fenêtres et châssis de très grande qualité, les deux étant liés. Les fabricants ont travaillé en étroite liaison avec les concepteurs pour pouvoir répondre à leur demande, c'est-à-dire des produits performants et qui garantissent leurs propriétés optiques et thermiques dans le temps et c'est le fruit de cette collaboration qui nous donne les produits verriers et fenêtres que nous avons sur le marché aujourd'hui.

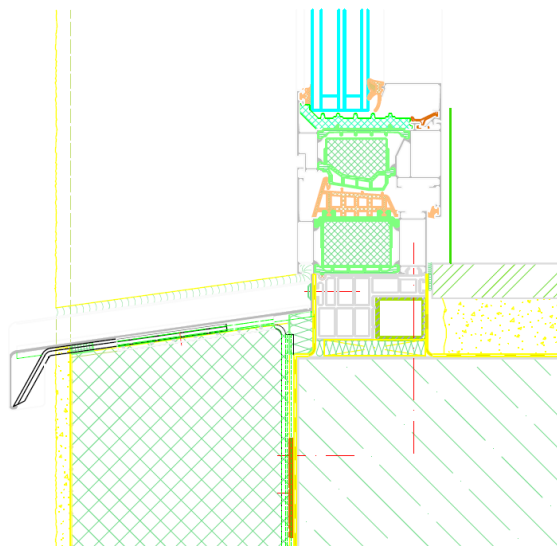


Figure 15 : Coupe sur l'ensemble d'une fenêtre (châssis, cadre et vitrage) encastrée dans un mur (Schüco).

Une fenêtre de maison passive est l'assemblage de produits suivants :

- Assemblage de 3 ou 3 vitres
- Application de couches peu émissives sur une face ou un film suspendu entre deux vitres.
- Un gaz de remplissage entre chaque vitre.
- D'écarteurs pour tenir les fenêtres qui jouent également le rôle de rupteurs de pont thermique.
- Un châssis performant qui assure la stabilité et le confort d'utilisation à l'ensemble et qui permet l'intégration au bâti.

La Figure 15 est l'exemple type d'une fenêtre performante que nous pouvons utiliser dans la conception d'une maison passive. Il faut remarquer la présence de rupteur de ponts thermiques dans le châssis lui-même et dans la liaison cadre/mur. Tout comme les ponts thermiques de liaison de construction, les fenêtres bénéficient d'une attention toute particulière pour éviter un flux de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur et assurer ainsi la continuité de l'enveloppe.

### 1.5.1 Le vitrage

Nous pouvons définir la résistance d'une paroi opaque par une simple somme des résistances de toutes les couches qui la composent mais il n'est pas aussi simple pour les vitres ou assemblages de vitres. Les vitres ont le double rôle d'apporter lumière et clarté au plus profond du bâtiment, mais aussi de nous protéger du froid et de la chaleur, minimiser les déperditions en hiver et les apports de chaleur en été. A priori, nous avons des besoins contradictoires pour le vitrage notamment apporter la lumière et protéger des variations climatiques.

Lorsque le rayonnement du soleil vient frapper une fenêtre, une partie est réfléchiée, une autre est absorbée dans l'épaisseur du verre et une troisième est transmise. Les vitres peuvent filtrer ce rayonnement suivant les besoins, et ce sont les propriétés optiques du vitrage qui nous intéressent. La question se pose alors de savoir : comment concevoir une fenêtre qui puisse répondre à nos besoins de lumière et protection ?

- Les propriétés optiques du vitrage

Seule une partie du rayonnement solaire qui atteint la terre est décomposée suivant les longueurs d'ondes Tableau 1 de la manière suivante :

	Ultraviolet	Visible	Infrarouge
Longueur d'onde (nm)	250 - 380	380 - 780	≤ 2 500
Pourcentage d'énergie dans rayonnement	6.4 %	48 %	45.6 %
Énergie (W/m <sup>2</sup> )	88	656	623

Tableau 1: Spectre solaire.

Le Tableau 1 nous montre cette décomposition. Nous pouvons remarquer que le spectre est visible seulement sur les longueurs d'onde de 380 à 780 nm, le reste étant décomposé en ultraviolet et infrarouge.

Lorsque le rayonnement du soleil vient frapper une fenêtre, une partie est réfléchiée, une autre est absorbée dans l'épaisseur du verre et une troisième est transmise. Les vitres peuvent filtrer ce rayonnement suivant les besoins (fenêtre résidentielle, serre horticole, contrôle solaire etc. ...), les fabricants nous proposent des produits qui répondent aux besoins en agissant sur le rayonnement qui atteint la fenêtre.

Pour illustrer notre exemple, nous allons prendre deux vitrages simples avec des propriétés bien distinctes. L'un est totalement clair, transparent, sans additif ou couleur et l'autre a reçu une couche basse émissivité qui a des propriétés intéressantes quant à la transmission/réflexion du rayonnement.

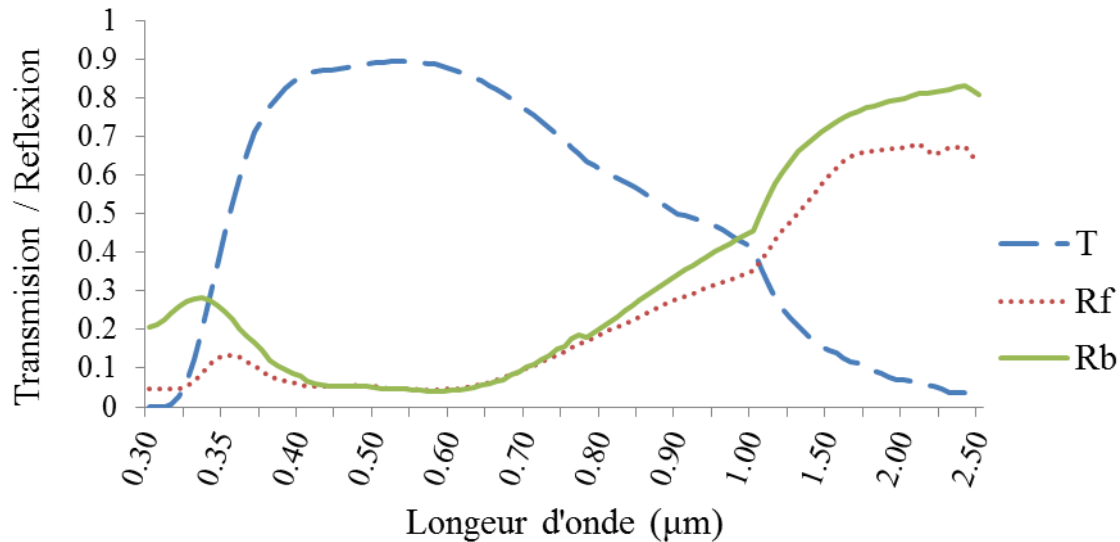


Figure 16 : Analyse du spectre d'un vitrage avec couche peu émissif.

La base de données provient du fabricant de produits verriers Saint Gobain Glass<sup>x</sup> et le logiciel d'analyse du spectre utilise est OPTICS<sup>xi</sup>, les résultats sont conformes à la norme NF EN 410.

La Figure 16 représente les propriétés optiques d'un vitrage avec une couche basse émissivité, en abscisse nous avons les longueurs d'onde (μm) et en ordonnée le taux de transmission/réflexion (%).

Nous pouvons remarquer l'influence d'une couche peu émissive sur les propriétés optiques de la vitre: sur les courtes longueurs d'onde (, entre 380 – 780 nm) nous avons un spectre qui est transmis à presque 90%, et seulement une partie qui sera réfléchi 10 – 20 %. Par contre les plus grandes longueurs d'ondes (infrarouges) sont nettement moins transmises, en effet la vitre va bloquer la transmission du rayonnement sur ces longueurs d'onde. Une autre remarque importante à faire est le constat que la transmission vers l'intérieur (courbe Rb) est légèrement plus importante que la transmission frontale (Rf) dans les ultraviolets et infrarouges. La vitre a la propriété intéressante de bloquer une partie du rayonnement qui l'atteint (surtout dans les infrarouges,) et de ne pas transmettre la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur.

Nous avons repris le même vitrage simple (Figure 17) que dans l'exemple précédant mais sans la couche basse émissivité. Le constat est évident, le vitrage transmet la majeure partie du rayonnement reçu (entre 75 et 90%), et ne réfléchit qu'une petite partie (moins de 10%).

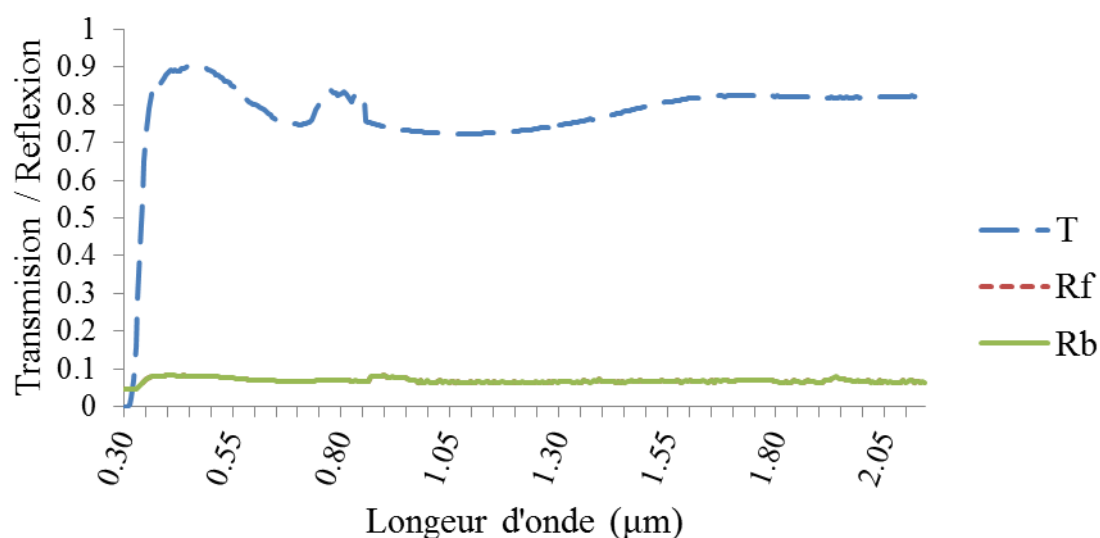


Figure 17 : Analyse optique d'un simple vitrage transparent.

Pour une maison passive, la composition du vitrage est primordiale, et nous devons composer l'ensemble du vitrage pour pouvoir obtenir les résultats souhaités notamment l'optimisation des apports de lumière et de chaleur tout en limitant les pertes. Tout comme l'étude des ponts thermiques, l'étude du vitrage est primordial lors de la conception d'une maison passive.



Figure 18 : Coupe sur structure d'un triple vitrage

La **Error! Reference source not found.** ci-dessus nous montre l'exemple type de l'assemblage d'un triple vitrage, tel que nous l'utilisons pour une maison passive. Nous nous proposons d'étudier les propriétés optiques du triple vitrage suivant :

- SGG Planitherm Ultra 4mm – Extérieur – Couche peu émissive tourne vers l'intérieur.
- SGG Planilux 4mm – Vitrage Transparent.
- SGG Planitherm Ultra 4mm – Extérieur – Couche peu émissive tourne vers l'intérieur.

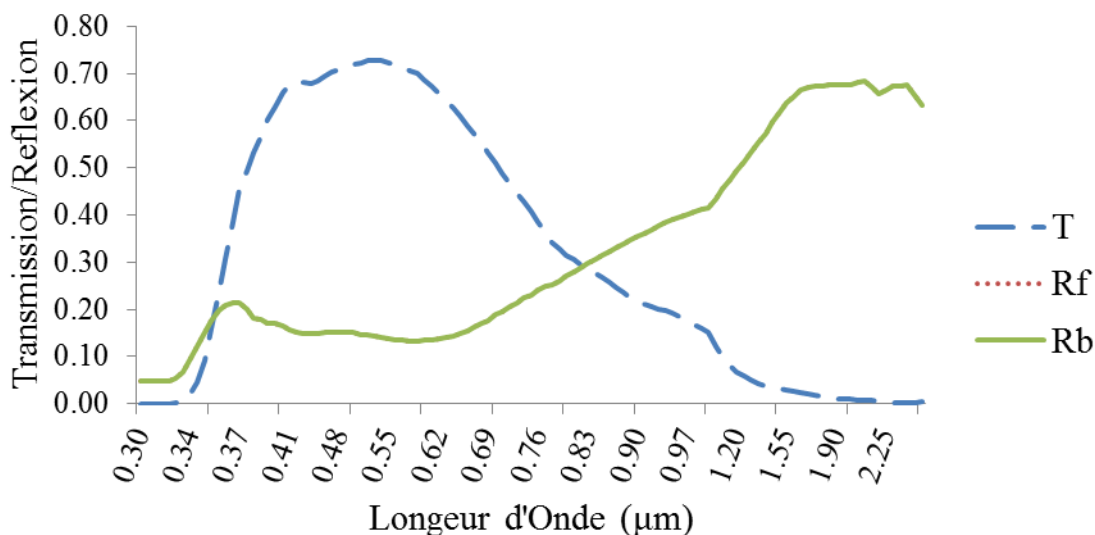


Figure 19 : Analyse du spectre optique d'un triple vitrage.

La Figure 19 nous indique l'importance des couches peu émissives sur l'ensemble de la fenêtre. Nous remarquons que le spectre visible (de 0.38 à 0.78 µm) est largement transmis à travers la vitre, plus de 60% sur cette bande, c'est-à-dire que la transmission lumineuse est correcte pour ce type de vitrage. Il est également intéressant de constater que le rayonnement est réfléchi sur les plus grandes longueurs d'onde, que ce soit pour la face interne (Rb) ou externe (Rf).

Une fenêtre n'est pas seulement un assemblage de vitres, mais comporte aussi un cadre qui joue un rôle prépondérant pour la continuité de l'isolation de l'enveloppe et du confort.

## 1.5.2 Cadre et châssis de fenêtre

L'ensemble du vitrage est maintenu par un cadre et les propriétés thermiques recherchées sont également la meilleure résistance possible au flux de chaleur. Nous ne rentrons pas dans le détail de conception mais il est intéressant de noter que le calcul de la résistance thermique des cadres et des châssis de fenêtres s'effectue également à l'aide du même type de logiciel que celui utilisé pour le calcul des ponts thermiques.

Il est intéressant de noter que les cadres et châssis qui remplissent les critères de résistance thermique pour une maison passive incluent tous des rupteurs de ponts thermiques. Les constructeurs ont pris un grand soin de limiter la quantité de flux de chaleur traversant le cadre mais il faut noter que c'est l'élément le moins performant de l'enveloppe d'une maison passive.

Nous pouvons distinguer les types de châssis suivants Figure 20:

- Châssis bois ou dérivés de bois. Ce sont des châssis économiques et performants mais qui nécessitent un entretien particulier pour la face exposée aux intempéries (protection de type lasure à renouveler tous les 5 ans).
- Châssis métalliques aluminium. La solidité, la légèreté et la durabilité de l'aluminium sont des atouts, par contre l'aluminium est un très bon



conducteur, en ce sens la présence de rupteurs de ponts thermiques est nécessaires (en général le remplissage du vide se fait par du polystyrène).

- L'acier était traditionnellement utilisé mais l'aluminium est l'alliage le plus répandu pour les cadres de fenêtres aujourd'hui.
- Châssis PVE et fibres de verre. Matériaux performants et légers, les fabricants ont fait des grands progrès pour éviter le vieillissement de la surface de ces cadres.



Figure 20 : Vue en coupe de 2 châssis de fenêtre Passivhaus (Bieber et Schüco).

- Châssis mixte bois/aluminium. La partie métallique du châssis est à l'extérieur garantissant une plus longue durée de vie à l'ensemble. Ce qui permet d'allier l'avantage du cadre aluminium à l'extérieur et la chaleur du bois à l'intérieur, ces cadres offrant des avantages intéressants et étant parmi les plus performants du marché.

La Figure 20 nous montre une vue en coupe des fenêtres le plus couramment mis en œuvre dans une maison passive. A droite nous avons une fenêtre mixte bois aluminium, et à gauche nous avons une fenêtre en aluminium sur lequel nous pouvons clairement remarquer l'inclusion de rupteurs de ponts thermiques (mousse de polyuréthane).

## 1.6 L'étanchéité à l'air

Tout comme l'isolant thermique, la barrière d'étanchéité à l'air doit être continue tout au long de la paroi intérieure du bâtiment. Toute discontinuité sera source de dégradations au niveau de l'enveloppe comme celles que nous avons pu remarquer pour les ponts thermiques (champignons, moisissures etc.).

L'infiltration est principalement due au passage d'air dans les interstices d'assemblage créés par des réservations dans les parois pour permettre le passage de conduits, gaines ou câbles. Ce problème sera rapidement réglé lors de la construction des premières maisons passives<sup>xiii</sup> et les fabricants aujourd'hui apportent des solutions simples et efficaces, dont nous avons un aperçu sur la Figure 21.



Figure 21 : Produits type de mise en étanchéité à l'air

Comme nous l'avons remarqué l'étanchéité, tout comme l'isolation, doit être posée en continu et sans interruption à l'intérieur de la maison pour garantir son efficacité. La Figure 23 en est une bonne illustration de ce principe, l'étanchéité à l'air étant représentée par le trait rouge.

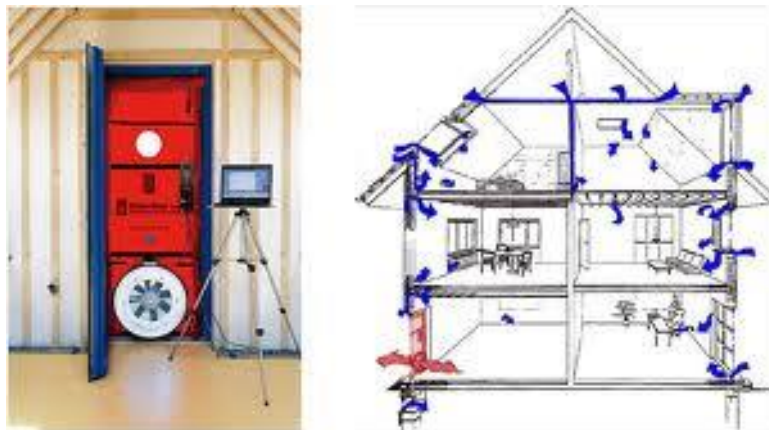


Figure 22 : Test de l'étanchéité à l'air, « blower door test ».

Le test d'étanchéité s'effectue à la fin de la mise hors eau du bâtiment et avant la pose de la finition des murs internes, comme nous pouvons le voir sur la Figure 22, ceci permettant de reprendre tout défaut de mise en étanchéité avant de terminer le second œuvre.

Le test s'effectue au moyen d'un ventilateur qui met en sous pression (ou dépression de 50 pascals) la maison par rapport à l'extérieur et les débits de fuite sont ensuite mesurés. Ce test est normalisé par la norme NF EN 13829. Les fuites sont détectées selon les méthodes suivantes :

- Par thermographie infrarouge.
- Par anémomètre qui détecte le débit de fuite à l'endroit de l'infiltration.
- Par une fumée artificielle colorée qui s'infiltré aux endroits perméables.

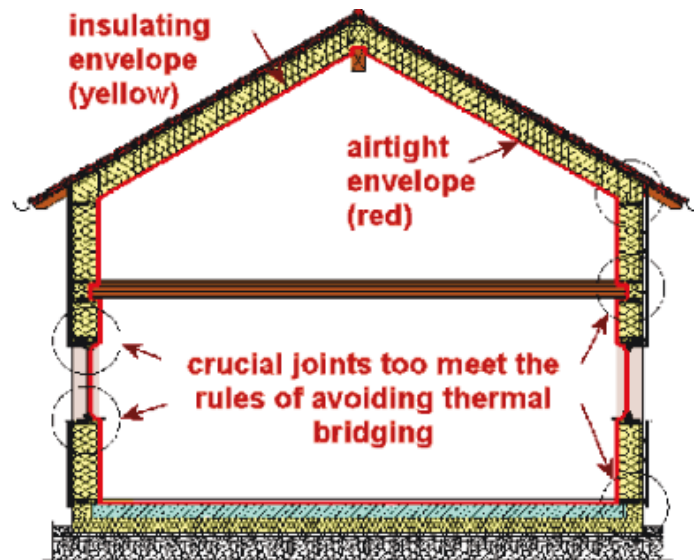


Figure 23 : Principe de l'étanchéité en continu d'une maison passive (PHPP).

Le résultat est donné sous forme de renouvellement du volume d'air de la maison par heure. Pour une enveloppe performante, nous cherchons à obtenir des valeurs largement en dessous de 0,5 Vol/h.

## 1.7 La ventilation

La ventilation favorise le confort des occupants en apportant un air neuf de qualité en continu et agit sur la consommation énergétique (de par la consommation énergétique du ventilateur lui-même et de ses auxiliaires, et également par les pertes de chaleur). Une mauvaise qualité de ventilation peut également avoir des effets négatifs sur la santé, l'air y est alors source de contaminants (tels le pollen ou les bactéries)<sup>xiii</sup> et il doit être filtré par le système. Nous pouvons remarquer les effets suivants :

- Un taux d'humidité élevé est associé avec l'accroissement de micro-organismes, tel que les moisissures et bactéries.
- La ventilation peut diluer la concentration ou disperser des bactéries aériennes
- Des bactéries peuvent croître dans des systèmes de ventilation et peuvent provoquer des liaisons pulmonaires.

On peut se demander quel lien y a-t-il entre l'enveloppe d'un bâtiment et la ventilation ? Le lien est double, au sens où nous avons à la fois l'interaction entre la surface interne de l'enveloppe avec la ventilation elle-même et l'infiltration de l'air à travers les parois.

Les images thermographiques (Figure 14) nous indiquent que les régions les plus froides d'un bâtiment sont là où nous rencontrerons des ponts thermiques, un air saturé en humidité aura tendance à se condenser sur ces zones. Sans une ventilation adéquate des pièces, l'humidité sur la paroi provoquera des dégradations, à terme ceci provoquera une diminution des performances thermiques de l'enveloppe et l'apparition de moisissures. Seule une ventilation maîtrisée dans toutes les pièces d'une maison passive peut prévenir ce type de dégât en assurant un renouvellement en continu de l'air sans zone de stagnation.

Pour résumer, si nous souhaitons concevoir un bâtiment économe en énergie et qui puisse apporter le confort et la sante aux occupants, nous devons bien maîtriser l'étanchéité à l'air et la ventilation. La solution la mieux adaptée pour une maison passive est le système à double flux, ou l'air entrant et sortant de la maison est contrôlé mécaniquement.

- Systèmes de Ventilation Double Flux

Le système de ventilation est le véritable cœur de la maison passive, apportant un air neuf, frais, filtré dans chaque pièce de la maison. Sans cette ventilation, les taux de CO2 deviennent rapidement inacceptables pour une bonne qualité de l'air, d'autant plus que l'enveloppe est étanche et que le renouvellement d'air par infiltration est au minimum.

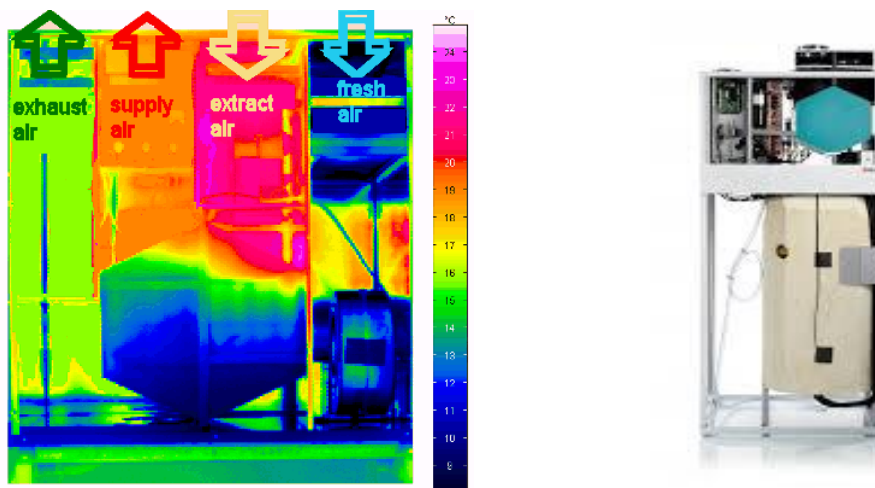


Figure 24 : Caisson de ventilation avec échangeur à plaques et ensemble caisson de ventilation, pompe à chaleur et ECS.

L'autre avantage de la ventilation double flux est la récupération des calories sur l'air extrait grâce à un simple échangeur ce qui permet de préchauffer l'air neuf qui rentre dans l'habitat. C'est une source d'énergie renouvelable, dont l'exemple d'un système type est illustré sur la Figure 24 . La récupération de chaleur est indispensable dans une conception de type passive car elle permet de diminuer (voir supprimer dans certains cas) les besoins en énergie pour le chauffage.

Pour résumer, la ventilation d'une maison passive doit être :

- Double flux (contrôle des débits d'air entrants et sortants de la maison), pour maintenir une qualité d'air optimale à l'intérieur d'un bâtiment.
- Équipée d'une récupération de chaleur, pour récupérer les calories de l'air extrait et préchauffer l'air neuf. L'appareil devra être équipé d'un by-pass pour les saisons intermédiaires lorsque la température extérieure est proche de la température de consigne et la récupération de chaleur est inutile
- Équipée d'un chauffage d'appoint pour amener l'air à la température de consigne en période hivernale.
- Certains modèles sont également équipés d'un ballon d'eau chaude pour profiter des calories gratuites et préchauffer l'eau chaude sanitaire.

## Chapitre 2

# Méthode de calcul des déperditions, confort thermique et bilan énergétique

## 2.1 Notions fondamentaux de thermique

### 2.1.1 Flux de chaleur ou transfert de chaleur

Une des définitions les plus claires de la chaleur nous est donnée par Frank P. Incropera et David P. Dewitt<sup>xiv</sup> « Le transfert de chaleur (ou chaleur) est l'énergie en transit due à une différence de température ». Dès que nous avons une différence de température dans un milieu ou entre plusieurs milieux, nous avons un transfert de chaleur. Ce transfert est toujours du milieu le plus chaud vers le plus froid.

Ceci nous amène à définir trois termes essentiels dans la thermique :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

### 2.1.2 La conduction

Quand un gradient de température existe dans un médium stationnaire, nous parlons de conduction (il s'agit en effet d'une activité moléculaire). Cette conduction ou flux de chaleur a toujours un sens.

La conduction est définie par la loi de Fourier :

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx}$$

Le flux de chaleur  $q_x''$  (W/m<sup>2</sup>K) est la quantité de chaleur transférée dans la direction x par unité de direction, perpendiculaire au transfert et proportionnelle au gradient de température.

La constante  $k$  est une des propriétés de transport, plus connue sous le terme de conductivité thermique en W/mK. Le signe négatif devant  $k$  nous indique que la chaleur est transférée dans le sens décroissant.

Dans un régime permanent et unidimensionnel, la distribution de température est linéaire, nous pouvons donc écrire le gradient de température suivant une longueur de segment  $L$  comme étant :

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Et le flux de chaleur devient donc :

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$q_x'' = k \frac{\Delta T}{L}$$

### 2.1.3 La convection

Auparavant, nous avons étudié le cas d'un solide, mais dans le cas d'un fluide nous ne pouvons plus parler de conduction. Le transfert de chaleur par convection est en fait composé de deux mécanismes, non seulement nous avons le transfert dû au mouvement (diffusion) des molécules mais nous avons aussi une énergie transmise par la masse du mouvement du fluide lui-même. Quand nous parlons de fluide, nous évoquons aussi bien de l'eau que de l'air.

Nous avons deux types de convection :

- La convection forcée : lorsqu'une force extérieure agit sur le mouvement (ou circulation du fluide).
- La convection naturelle ou libre : lorsque les mouvements sont provoqués par des forces internes du fluide, par échauffement ou refroidissement.

Processus	$h$ (W/m <sup>2</sup> K)
Convection libre	
Gaz	2-25
Liquides	50-1000
Convection Forcée	
Gaz	25-250
Liquides	50-20000
Convection avec changement d'état	
Ébullition ou condensation	2500-100000

Tableau 2 : Valeurs usuelles pour le coefficient  $h$

La convection s'exprime sous la forme suivante, ce que nous appelons la Loi de Newton du refroidissement :

$$q'' = h (T_s - T_\infty)$$

Le terme  $q''$ , ou flux de chaleur par convection, est exprimé en  $W/m^2$  et est proportionnel à la différence entre les températures du fluide et de la surface respectivement. Avec  $h$ , exprimé en  $W/m^2K$ , étant le coefficient d'échange thermique.

Le coefficient d'échange  $h$  dépend la vitesse du fluide, des conditions aux limites, ces dernières sont dépendantes de la géométrie de la surface, la nature du fluide lui-même influence le coefficient. Toute étude de la convection passe obligatoirement par une étude de la manière dont le coefficient  $h$  peut être déterminé mais en règle générale nous nous limitons à des valeurs par défaut précédemment établies et couramment acceptées telles que nous en avons dans le Tableau 2.

### 2.1.4 Le rayonnement

Le rayonnement thermique est l'énergie émise par une matière à une température donnée. Contrairement à la conduction ou à la convection qui ont besoin d'un médium pour le transfert énergétique, le rayonnement se passe sans médium et le transfert idéal se passe dans le vide.

Tous les matériaux émettent et reçoivent des ondes électromagnétiques et ce de manière continue. Nous parlons alors d'émission (diminution) ou réception (augmentation) du niveau d'énergie. Pour le transfert de chaleur par rayonnement les longueurs d'onde les plus significatives se situent entre  $0,1 \mu$  et  $100 \mu$  (rayonnement ultraviolet, rayonnement visible puis rayonnement infrarouge), il est intéressant de noter que nous ne percevons à l'œil nu qu'une infinie partie de ce rayonnement (Figure 25).

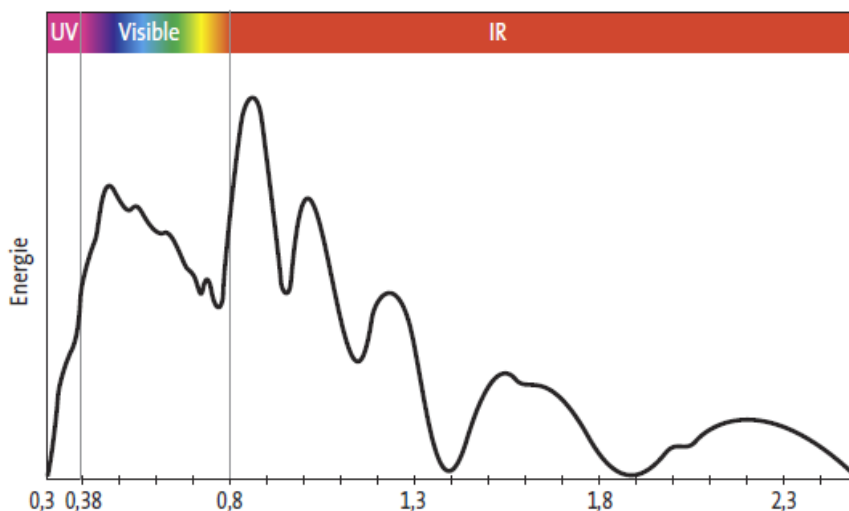


Figure 25 : Décomposition du spectre solaire en  $\mu m$  selon la norme EN 410 (Saint Gobain memento)

Le rayonnement qui est émis par une surface provient de l'énergie thermique liée à cette même surface et la puissance à laquelle cette énergie est libérée s'appelle la puissance émissive, notée  $E$  en  $W/m^2$ . Cette puissance a une valeur haute limite, c'est la loi de Stefan-Boltzmann :

$$E_b = \sigma T_s^4$$

Avec  $T_s$  la température absolue en  $K$  de la surface émettrice et  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann qui a pour valeur  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ , cette valeur est celle du corps noir, c'est à dire l'émetteur parfait.

Pour une surface réelle, le flux de chaleur émise est moins que celle du corps noir à la même température et nous pouvons l'écrire de la manière suivante :

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Dans cette équation la propriété radiative de la surface est appelée émissivité et notée  $\varepsilon$ , de valeur comprise entre  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , cette propriété définit l'efficacité d'une surface à émettre le rayonnement par rapport au corps noir qui représente l'émetteur/récepteur parfait (valeur de 1).

Nous devons aussi évoquer le terme de rayonnement incident reçu sur une surface. Ce rayonnement peut provenir d'une source distincte, comme le soleil par exemple, ou d'une source plus diffuse comme la réflexion de la neige. Nous parlons alors d'irradiation le rayonnement reçu sur une surface, elle est notée  $G$ .

Tout ou une partie du rayonnement peut être absorbée par la surface, ceci permettra d'accroître l'énergie thermique contenue dans le matériau. La vitesse à laquelle le rayonnement peut être absorbé par une surface peut être déterminée par la connaissance de la propriété radiative surfacique appelée l'absorptivité et notée  $\alpha$ , avec  $0 \leq \alpha \leq 1$  tel que :

$$G_{abs} = \alpha G$$

Dans le cas où  $\alpha < 1$  et la surface est opaque, une portion du rayonnement est réfléchi. Si la surface est semi-transparente, une portion du rayonnement peut être transmise. Ces notions sont d'une importance capitale pour comprendre les phénomènes dus à la transmission à travers le vitrage d'une maison passive. Il faut noter que la valeur de  $\alpha$  dépend à la fois de la nature de l'irradiation et de la surface elle-même.

Il est également intéressant pour nous de définir l'échange du rayonnement entre une petite surface  $T_s$  et une surface isotherme plus grande  $T_{sur}$  qui entoure complètement le premier tel que  $T_{sur} \neq T_s$ . Nous allons prendre l'hypothèse que cette surface peut être assimilée au corps noir tel que :

$$G = \sigma T_{sur}^4$$

Si nous assumons que le rayonnement est tel que  $\alpha = \varepsilon$  (une surface grise), le flux net par unité de surface peut s'écrire de la manière suivante :

$$q_{ray} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

Cette formule nous permet d'écrire la différence entre l'énergie thermique qui est libérée due au rayonnement et celle qui est acquise par absorption.



En thermique il est parfois plus pratique pour nous d'exprimer le rayonnement net échangé de la manière suivante :

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{sur})$$

Avec  $h_r$ , le coefficient d'échange thermique du rayonnement étant :

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2)$$

Les surfaces peuvent aussi simultanément transférer de la chaleur par convection vers un gaz adjacent à cette dernière, l'échange complet s'écrit de la manière suivante :

$$q = q_{conv} + q_{ray} = hA(T_s - T_{\infty}) + \varepsilon A\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

## 2.2 Le confort thermique

Le confort thermique doit être pris en compte lors des calculs d'un bâtiment passif et aussi dans d'autres normes nationales et internationales (HQE, LEED, BREAM etc...). C'est une notion qui est apparue en même temps que les notions d'économies d'énergie car cela permet de fixer des valeurs de climat intérieur minimales à atteindre suivant le comportement des occupants et de leurs besoins métaboliques.

Cette notion de confort est complexe car pour atteindre un niveau acceptable par le métabolisme nous devons prendre en compte des facteurs divers qui dépendent soit d'unités mesurables telles que la vitesse de l'air ou le taux d'humidité ambiante ou des paramètres variables et presque uniques pour chacun d'entre nous tels que l'activité métabolique, le poids et même le régime alimentaire.

Une des notions fondamentales du confort thermique étant la notion de température opérative ou température opératoire, nous allons reprendre la définition de la norme ISO 7730 :

« La température opérative  $T_o$  est la température uniforme d'une enceinte rayonnante noire dans laquelle un occupant échangerait la même quantité de chaleur par rayonnement et convection que dans l'ambiance non uniforme réelle. »

Nous allons définir une température en fonction des échanges entre une personne (suivant son activité) avec son environnement immédiat, ceci est traduit par des indices de satisfaction et d'insatisfaction

Nous allons adopter le modèle de Fanger –comme critère de confort pour les besoins de notre étude et ceci selon la norme EN 15251. En effet cette norme préconise de prendre ce modèle s'il y'a un rafraîchissement dit actif, ceci sera notre cas avec l'utilisation d'une pompe à chaleur réversible<sup>3</sup>, mais nous souhaitons annuler tous les besoins de rafraîchissement actif par l'optimisation de l'enveloppe

Le modèle de Fanger du confort thermique est une équation d'équilibre thermique ou la production de chaleur nette d'un corps humain est égale à zéro lorsqu'il est dans un état de

---

<sup>3</sup> Les premières maisons passives utilisaient également une pompe à chaleur réversible.

confort (pas d'échange avec l'extérieur). Le résultat de cette équation est traduit dans un index que nous appelons le « PMV Index<sup>4</sup> » et le « PPD Index ».

Sur la Figure 26, nous pouvons constater le rapport entre les indices PMV et PPD. Les recommandations du Passive House Institute préconisent un dépassement maximal de l'indice de confort PPD de 10%, c'est-à-dire que nous nous situons entre l'index PMV -0.5 et +0.5 dans la zone neutre.

Cette même définition du confort est reprise dans la Norme ISO 7730:2005 Annexe A, en définissant des catégories de confort :

- A: PPD < 6%
- B: PPD < 10%
- C: PPD < 15%

Selon cette même norme une maison Passive doit être de Catégorie de confort A.

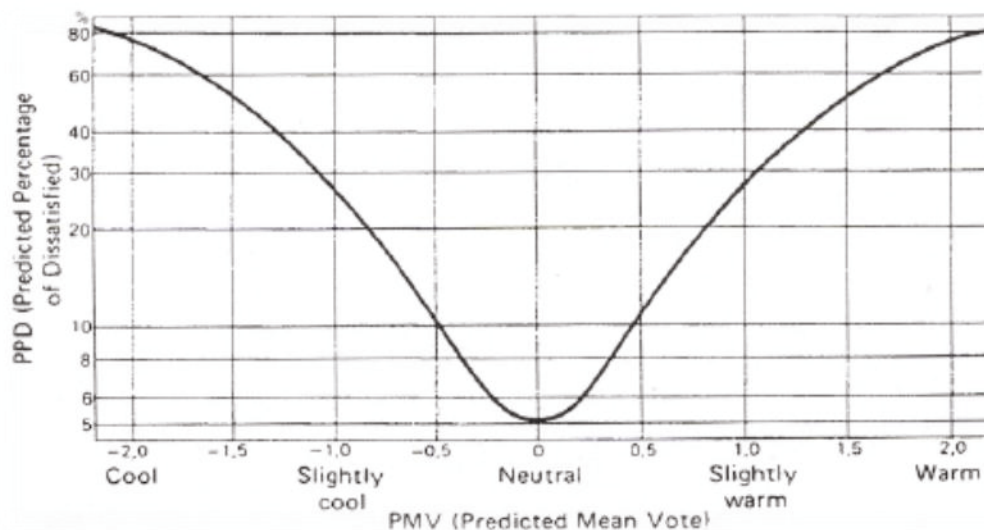


Figure 26 : Rapport entre les indices PMV et PPD

La Norme NF EN ISO 7730<sup>xv</sup> prescrit en annexe des recommandations pour qu'un index soit compris entre  $-0.5 < PMV < + 0.5$  (soit un pourcentage d'insatisfaction de 10%) identique aux critères admissibles pour une maison passive.

L'intérêt de ces prescriptions réside dans le fait qu'une distinction est faite entre hiver et été, et pour nous il est intéressant de les reprendre dans notre document car nous avons une indication sur les critères requis pour atteindre le niveau de confort.

- Les hypothèses de départ sont :
  - Humidité Relative de 50%
  - Activité légère, essentiellement sédentaire ( $70 \text{ W/m}^2=1.2 \text{ met}$ )

<sup>4</sup> PMV : Predicted Mean Vote, traduit en Français par Pourcentage de Vote Moyen  
PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied, traduit par Pourcentage Moyen d'Insatisfaction

La norme fait la distinction entre les conditions hivernales et estivales dont le détail suit :

○ Conditions Hivernales :

- La température opérative doit être comprise entre 20 °C et 24 °C (c'est-à-dire 22 °C +/- 2 °C), Figure 27 et Figure 28.
- La différence verticale de la température de l'air entre 2,1 m et 0,1m au-dessus du sol (niveau de la tête et des chevilles) doit être inférieure à 3 °C.
- La température au niveau du sol doit normalement être comprise entre 19 °C et 26 °C, mais les systèmes de chauffage par le sol doivent être conçus pour 29 °C
- La vitesse moyenne de l'air doit être inférieure aux valeurs prescrites dans la Figure 27. **Error! Reference source not found.**
- L'asymétrie de température de rayonnement de fenêtres ou d'autres surfaces verticales doit être inférieure à 10 °C (par rapport à un petit élément plan vertical à 0,6 m au-dessus du sol)<sup>5</sup>.
- L'asymétrie de température de rayonnement d'un plafond tiède (chauffe) doit être inférieure à 5 °C par rapport à un petit élément plan horizontal à 0.6m au-dessus du sol.
- L'Humidité relative doit être comprise entre 30 % et 70%.

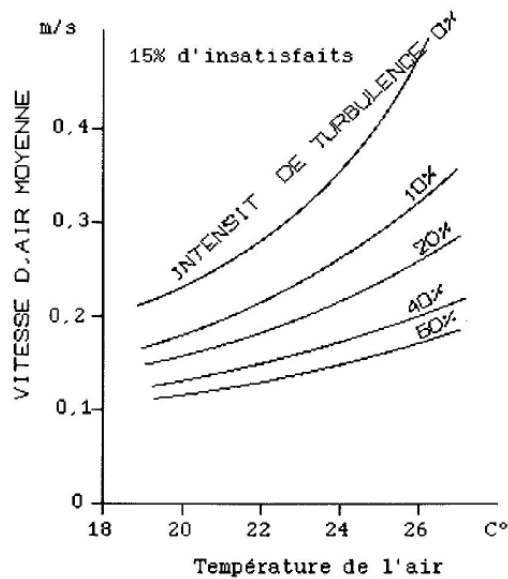


Figure 27 : Vitesse d'air moyenne permise en fonction de la température de l'air et l'intensité de turbulence (ISO 7730)

○ Conditions Estivales:

- La température opérative doit être comprise entre 23 °C et 26 °C (c'est-à-dire 24.5 °C +/- 1.5 °C), Figure 27 et Figure 28.

<sup>5</sup> C'est ce que nous appelons la sensation de paroi froide (ou chaude), ce qui est une des plus grandes sources d'inconfort dans les bureaux par exemple.

- La différence verticale de température de l'air entre 2,1 m et 0,1 m au-dessus du sol (niveau de la tête et niveau des chevilles) doit être inférieure à 3 °C.
- La vitesse moyenne de l'air doit être inférieure aux valeurs prescrites dans la Figure 27.
- L'humidité relative doit être comprise entre 30% et 70%.

Il est intéressant de remarquer que la norme ISO 7730 nous définit une température opérative optimale en établissant une équation qui a comme solution  $PMV = 0$  tout en tenant compte de l'activité métabolique et du vêtement. Les résultats sont donnés dans la Figure 28 ci-dessous.

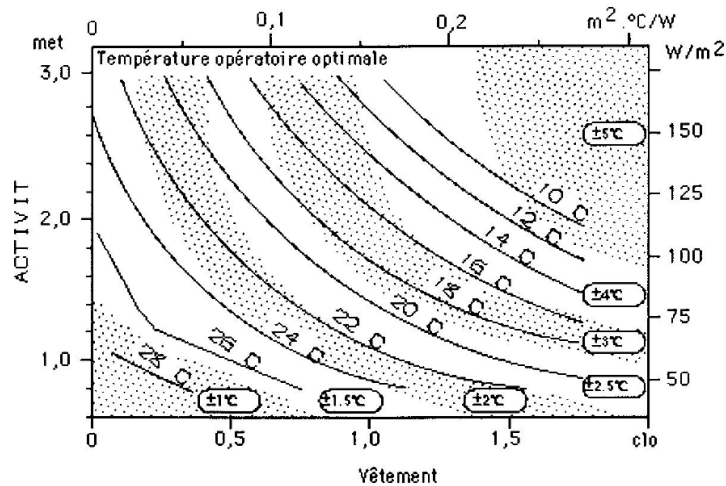


Figure 28 : Approche de la température opérative optimale ( $PMV = 0$ ).

### 2.3 Calcul des besoins énergétiques

Nous avons évoqué les grands principes de thermique du bâtiment et le confort. Maintenant nous allons voir plus en détail le calcul en besoins énergétiques d'un bâtiment.

Les besoins énergétiques présentés sous forme de régime permanent, c'est-à-dire que l'ensemble de températures intérieures et extérieures sont en équilibre et que nous n'avons pas de fluctuations (température, humidité, vitesse du vent etc.). Un régime dynamique suppose des variations et oscillations dans les données de base et même dans la température à la surface des matériaux des parois eux-mêmes, nous allons aborder le régime dynamique en fin de chapitre.

Le principe de calcul suivant est celui défini dans la norme NF EN ISO 13790, cette même norme est préconisée par l'Institut de la Maison Passive. Dans un premier temps, nous devons définir la notion de zone thermique.

#### ○ Zones Thermiques

Un bâtiment est composé de plusieurs pièces, chacune avec ses propres caractéristiques (nombre de fenêtres, nombre d'occupants, types d'apports, donnant sur l'extérieur, isolé ou

non etc.) et sert une fonction (séjour, chambre etc.), ces pièces nous les appelons zones thermiques ou zones.

La norme préconise une division en zones pour une différence de température de 4 °C . Cette même norme indique que dans le cas où les portes restent ouvertes il est également inutile de diviser en zones distincts. Dans notre cas nous allons outrepasser ces recommandations car nous avons besoin d'un découpage en zones pour le calcul d'optimisation de l'enveloppe, ces derniers seront surtout définis par orientation de la façade (Nord, Est, Ouest et Sud) ce qui nous permettra une optimisation des fenêtres par exemple

### 2.3.1 Les déperditions de chaleur

La méthode de calcul consiste à diviser le bâtiment en zones thermiques distinctes, pour chaque zone des données d'entrée doivent être définies. Ces données sont aussi bien géométriques (orientation du bâtiment, fenêtres, ombres etc.) que physiques (nombre de personnes, lumière artificielle, machinerie etc.).

- Données d'entrée pour les apports de chaleur :
  - $\Phi_i$  : puissance des apports internes moyens (W)

Pour les surfaces vitrées, les données suivantes devront être recueillies pour chaque orientation :

- $A_j$  : aire de l'ouverture (fenêtre ou porte)
- $FF_j$  : facteur de réduction pour l'encadrement (surface du cadre), fraction transparente  $A_j$
- $F_{sj}$  : facteur d'ombre, fraction moyenne ombragée  $A_j$
- $g_j$  : coefficient de transmission d'énergie solaire totale pour rayonnement solaire
- Données d'entrée pour les besoins énergétiques :
  - $Q_{hs}$  : pertes du système de chauffage
  - Données climatiques

Pour un calcul simple, c'est-à-dire sans faire une simulation thermique dynamique, il faudra présenter les moyennes mensuelles de température et d'ensoleillement<sup>xvi</sup>.

- Déperditions de base totales :

Les déperditions de base totales pour un espace chauffé en intermittence, notées  $Q_i$  s'expriment de la manière suivante :

$$Q_i = H_i(\theta_i - \theta_e)t$$

Avec :

- $\theta_i$  : est la température de consigne
- $\theta_e$  : est la température extérieure

- $t$  : est la durée de la période

$H_i$  : est le coefficient de déperdition de la zone tel que :

$$H_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i}$$

Ceci nous amène à définir les déperditions suivantes :

- $\Phi_{T,i}$  : Les déperditions par transmission pour l'espace  $i$ , en  $W$ .
- $\Phi_{V,i}$  : Les déperditions par renouvellement d'air pour l'espace  $i$ , en  $W$ .
- Les déperditions de base par transmission

Les déperditions de base par transmission pour ce même espace  $i$ , chauffé, notées  $\Phi_{Ti}$ , exprimées en  $W$ , se calculent comme suit :

$$\Phi_{Ti} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij})(\theta_{nt,i} - \theta_e)$$

Ces déperditions,  $\Phi_{Ti}$  sont sous forme de flux de chaleur car nous avons une différence de température,  $\theta_{nt,i}$  étant la température intérieure de base de l'espace chauffé et  $\theta_e$  la température extérieure de base (les deux termes sont en °C).

Les déperditions se décomposent de la manière suivante :

- $H_{T,ie}$  : est le coefficient de déperdition par transmission pour un espace chauffé,  $i$ , vers l'extérieur,  $e$ , à travers l'enveloppe du bâtiment en  $W/K$ .
- $H_{T,iue}$  : est le coefficient de déperdition par transmission de l'espace chauffé,  $i$ , vers l'extérieur,  $e$ , à travers l'espace non chauffé en  $W/K$ .
- $H_{T,ig}$  : est le coefficient de déperdition par transmission à travers le sol en régime permanent de l'espace chauffé,  $i$ , vers l'extérieur,  $e$ , à travers l'espace non chauffé en  $W/K$ .
- $H_{T,ij}$  : est le coefficient de déperdition par transmission de l'espace chauffé,  $i$ , vers un espace voisin,  $j$ , chauffé à une température significativement différente, en  $W/K$ .
- Les déperditions nominales par renouvellement d'air  $\Phi_{V,i}$  pour un espace chauffé se calculent comme suit :

$$\Phi_{Vi} = H_{V,i}(\theta_{nt,i} - \theta_e)$$

Les déperditions se décomposent de la manière suivante :

- $H_{V,i}$  : sont les déperditions nominales par renouvellement d'air en  $W/K$ .

Nous allons aborder le détail de calcul des déperditions de base, notées  $H$

- Coefficient de déperditions directes vers l'extérieur :  $H_{T,ie}$

Ce coefficient correspond à l'ensemble de parois et ponts thermiques linéaires séparant l'espace chauffé de l'extérieur. Ce coefficient se calcule de la manière suivante et est noté en W/K :

$$H_{T,ie} = \sum A_k U_K e_k + \sum \psi_l l_i e_l$$

Nous avons les termes suivants :

- $A_k$  : aire de la paroi  $k$  en  $m^2$
- $U_K$  : le coefficient de transmission thermique de la paroi,  $k$ , en  $W/m^2K$ . Le calcul est différent suivant que ce soit des parois opaques ou de fenêtres, et les calculs afférents sont détaillés dans ce chapitre.
- $\psi_l$  : est le coefficient de transmission thermique linéaire du pont thermique en  $W/mK$
- $l_i$  : la longueur du pont thermique linéaire entre l'extérieur et l'intérieur en  $W$ .
- $e_k$  et  $e_l$  : sont des facteurs correctifs tenant compte des influences climatiques, mais nous n'en tenons pas compte dans un calcul dynamique. Nous expliquerons pourquoi à la fin de ce chapitre. Nous prenons donc comme valeur  $e_k = e_l = 1$

- Coefficient de déperdition à travers un espace non chauffé :  $H_{T,iue}$

Dans le cadre d'une maison Passive, ceci correspondra à un espace tampon tel qu'un vestibule d'entrée ou une buanderie, le coefficient déperdition  $H_{T,iue}$  se calcule de la manière suivante et est noté en W/K :

$$H_{T,iue} = \sum A_k U_K b_u + \sum \psi_l l_i b_u$$

- $A_k$  : aire de la paroi,  $k$  en  $m^2$
- $U_K$  : le coefficient de transmission thermique de la paroi,  $k$ , en  $W/m^2K$ .
- $\psi_l$  : est le coefficient de transmission thermique linéaire du pont thermique en  $W/mK$
- $l_i$  : la longueur du pont thermique linéaire entre l'extérieur et l'intérieur en  $W$ .
- $b_u$  : facteur de réduction de température prenant en compte la différence de température de l'espace non chauffé et la température extérieurs nominale

- Coefficient de déperdition à travers le sol :  $H_{T,ig}$

Le flux de chaleur qui traverse les planchers et les murs en contact avec le sol dépend de plusieurs facteurs dont certains sont difficiles à déterminer ou estimer du fait des caractéristiques physiques de ces derniers. La méthode de calcul ci-dessous est reprise en détail dans ce chapitre (la méthode ci-dessous ne tient pas compte des ponts thermiques). Le coefficient nominal de déperdition par transmission à travers le sol en régime permanent, se calcule comme suit et est donné en W/m.K :

$$H_{T,ig} = f_{g1}f_{g2} \left( \sum A_k U_{equiv,k} \right) G_w$$

- $A_k$  : aire de la paroi,  $k$  en  $m^2$
  - $U_k$  : le coefficient de transmission thermique de la paroi,  $k$ , en  $W/m^2K$ .
  - $G_w$ : est un facteur correctif tenant compte de l'influence de l'eau souterraine, ceci est valable pour un calcul en régime permanent seulement.
  - $f_{g1}$  et  $f_{g2}$  sont des facteurs correctifs tenant compte des fluctuations des températures annuelles, valable également en régime permanent seulement.
- Coefficient de transfert de chaleur en direction ou en provenance d'espaces chauffés à une température différente :  $H_{T,ij}$

$H_{T,ij}$  exprime la chaleur transférée par transmission entre un espace chauffé  $i$ , et un espace chauffé voisin,  $j$ , à une température sensiblement différente, par exemple une salle de bains et est donnée en W/mK :

$$H_{T,ij} = \sum f_{ij} A_k U_k$$

- $A_k$  : aire de la paroi,  $k$  en  $m^2$
  - $U_k$  : le coefficient de transmission thermique de la paroi,  $k$ , en  $W/m^2K$ .
  - $f_{ij}$  : est le facteur de réduction de température prenant en compte la différence entre la température de l'espace adjacent et la température extérieure nominale.
- Coefficient de déperdition par renouvellement d'air

Le principe de calcul : les déperditions par renouvellement d'air sont calculées de la manière suivante :

$$H_v = \rho_a c_a [V \dot{V}]$$

Avec :

- $V \dot{V}$  : le débit d'air à travers l'espace chauffé et le débit d'air transitant dans le bâtiment au travers de l'espace chauffé (infiltration) en  $m^3/s$ .



- $\rho_a c_a$  : capacité thermique de l'air,  $\approx 1\,200 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$  ou  $0,34 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K})$ .

Il faut se référer aux normes nationales ou internationales pour les débits d'air à prendre en compte. Nous y reviendrons lors de la présentation du modèle.

- Débit total des systèmes de ventilation mécanique

Le débit total d'air doit non seulement tenir compte de la somme des débits d'air du système mécanique  $[\dot{V}]_f$  mais également du débit d'air supplémentaire  $[\dot{V}]_x$ , induits par le vent et le tirage thermique du fait des entrées d'air et des infiltrations dues aux défauts d'étanchéité tel que :

$$[\dot{V}_{\text{dot}}] = [\dot{V}_{\text{dot}}]_f + [\dot{V}_{\text{dot}}]_x$$

Nous sommes dans le cas d'un système de ventilation à double flux et la norme NF EN ISO 13790 admet que  $[\dot{V}_{\text{dot}}]_f$  est égal à la plus grande des valeurs entre le débit d'air insufflé,  $[\dot{V}_{\text{dot}}]_{\text{sup}}$  et le débit d'air extrait,  $[\dot{V}_{\text{dot}}]_{\text{ex}}$ .

$[\dot{V}_{\text{dot}}]_x$ , peut être calculé de la manière suivante :

$$[\dot{V}_{\text{dot}}]_x = \frac{V n_{50} e}{1 + \frac{f}{e \left[ \frac{[\dot{V}_{\text{dot}}]_{\text{sup}}}{V n_{50} e} \right]}}$$

- $n_{50}$  : est le taux de renouvellement d'air résultant d'une différence de pression de 50 Pa entre l'extérieur et l'intérieur, incluant les effets des entrées d'air
- $e$  et  $f$  sont des coefficients d'exposition au vent

- Systèmes mécaniques avec récupération de chaleur

La récupération de chaleur est située entre l'air extrait et l'air neuf, cette norme tient compte d'une efficacité globale du système notée  $\eta_v$  qui vient réduire les déperditions de chaleur par la ventilation mécanique :

$$[\dot{V}_{\text{dot}}] = [\dot{V}_{\text{dot}}]_f (1 - \eta_v) + [\dot{V}_{\text{dot}}]_x$$

### 2.3.2 Les apports de chaleur

- Apport de Chaleur Total

L'apport de chaleur total  $Q_g$  représente la somme totale des apports internes et les apports solaires tels que :

$$Q_g = Q_i + Q_s$$

- Apports internes de chaleur

Les apports internes  $Q_i$ , comprennent toute quantité de chaleur générée dans l'espace chauffé par des sources internes (autres que les systèmes de chauffage eux-mêmes), comme par exemple :

- Les apports métaboliques des occupants
- La consommation énergétique des appareils et de l'éclairage artificiel

Cette méthode tient compte de valeurs moyennes sur une période donnée, l'équation devient alors :

$$Q_i = [\Phi_{i,h} + (1 - b)\Phi_{i,u}]t = \Phi_i t$$

- Apports solaires

$$Q_s = \sum_j \left[ I_{sj} \sum_n A_{snj} \right] + (1 - b) \sum_j \left[ I_{sj} \sum_n A_{snj,u} \right]$$

- $I_{sj}$  est le rayonnement solaire, par exemple l'énergie totale sur la période de calcul, du rayonnement solaire global incident sur une superficie de  $1 \text{ m}^2$  ayant l'orientation  $j$ , en  $\text{j/m}^2$ .
- $A_{snj}$  est l'aire réceptrice effective de la surface  $n$  ayant l'orientation  $j$ , c'est-à-dire l'aire d'un corps noir conduisant au même apport solaire que la surface considérée.

- Aire réceptrice équivalente d'éléments vitrés

$$A_s = AF_S F_F g$$

- $A$  est l'aire totale de l'élément vitré,  $\text{m}^2$ .
- $F_S$  facteur de correction pour l'ombrage.
- $F_F$  est le facteur de réduction pour les encadrements, égal au rapport de la surface transparente à l'aire totale de l'élément vitré.
- $G$  est le facteur solaire du vitrage.

### 2.3.3 Détail des déperditions par les surfaces vitrées

- Le Coefficient de Transfert Thermique,  $U_g$

Ce sont les propriétés thermiques/physiques de la surface vitrée elle-même qui vont influencer sur le comportement énergétique global de la fenêtre (vitrage et cadre). Les définitions et méthodes de calculs suivantes sont selon les normes Européennes, notamment EN 673, sauf indication contraire.

La transmission thermique d'une fenêtre dépend directement de :

- Les résistances surfaciques
- La Conduction
- La Convection
- Le Rayonnement

Le coefficient de transfert thermique pour une vitre ou assemblage de vitres, noté  $U_g$  et exprimé en  $W/m^2K$  s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{1}{U_g} = \frac{1}{h_u} + \frac{1}{h_r} + \frac{1}{h_i}$$

Ou nous avons :

$$\frac{1}{h_r} = \sum_1^M \frac{1}{h_g} + \sum_1^N d_i \lambda_i$$

Avec :

- $U_g$  : Transmission thermique de l'ensemble du vitrage ( $W/m^2K$ ).
- $h_u$  : Coefficient de transfert de chaleur contre l'air extérieur ( $W/m^2K$ ).
- $h_i$  : Coefficient de transfert de chaleur contre l'air intérieur ( $W/m^2K$ ).
- $h_r$  : Coefficient de transfert de chaleur de l'ensemble du vitrage ( $W/m^2K$ ).
- $h_g$  : Coefficient de transfert de chaque espace dans vitrage, gaz ou air ( $W/m^2K$ ).
- $M$  : Nombre d'espaces dans le vitrage.
- $N$  : Nombre de couches de vitrage.
- $d_i$  : Épaisseur de chaque vitre (m).
- $\lambda_i$  : Conductivité thermique de chaque vitrage ( $W/mK$ ).
- 
- Facteur Solaire,  $g_g$ .

Le flux incident du rayonnement solaire sur une vitre n'est pas totalement transmis à l'intérieur du local. Une partie est directement réfléchi, une partie est absorbée par le vitrage et restituée par rayonnement et le reste est transmis directement à travers le vitrage tel que :

$$g_g = \tau_e + q_i$$

Avec  $\tau_e$  l'énergie solaire directement transmise à travers le vitrage et  $q_i$  l'énergie solaire indirectement transmise à travers le vitrage.

Nous avons :

$$\rho_e + \alpha_e + \tau_e = 1$$

Avec  $\alpha_e = q_i + q_e$

Et  $q_i = \alpha_e \frac{h_i}{h_i + h_e}$

La norme EN 410 nous définit la transmission solaire directe  $\tau_e$  sur la longueur d'onde  $\lambda$  comprise entre  $300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2500 \text{ nm}$  comme :

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_{\lambda} \tau(\lambda) \Delta\tau}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda}$$

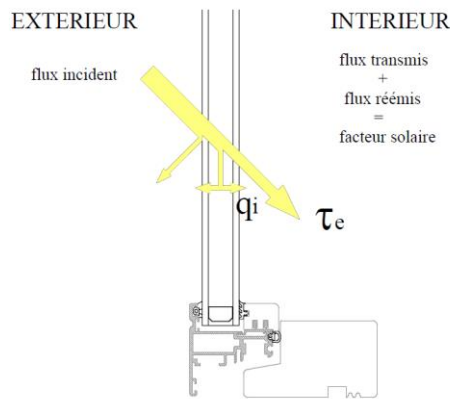


Figure 29 : Décomposition du facteur solaire.

- Transmission Lumineuse :  $\tau$

$$\tau_t = \frac{\tau_v^* \cdot A_v}{A'}$$

La lumière pénétrant à travers le vitrage est fonction de la transmission du verre (des couches successives) par le rapport de la surface apparente du vitrage,  $A_g$ , et la surface de la fenêtre dans son intégralité,  $A'$ .

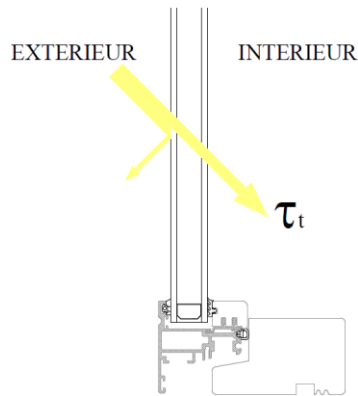


Figure 30 : Transmission lumineuse à travers le vitrage.

$\tau_v^*$  (transmission visible) est en général fourni par les fabricants des produits verriers, ou se calcule sur un logiciel adapté (Glass 98 de PILKINGTON Glass, Windows du LBNL). Ce paramètre est fonction du type de verre utilisé (opaque, transparent, translucide, colore ou non etc.).

Les produits verriers contenant le plus de minerai de fer auront tendance à bloquer une grande partie du rayonnement reçu et donc une moins grande transmission lumineuse. Nous devons donc adapter les produits verriers suivant le type de climat et le résultat souhaitée, une étude des paramètres optiques d'un vitrage est primordiale dans l'optimisation de l'enveloppe.

Ce coefficient est normalisé et défini dans l'EN 410 pour les longueurs d'onde  $\lambda$  visible à l'œil nu  $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$  tel que :

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_{\lambda} \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda}$$

- Le Coefficient de Transfert Thermique de la Fenêtre,  $U_w$ .

Le coefficient de transfert thermique de la fenêtre tient compte de l'ensemble des composants, et est défini par la norme NF EN ISO 1077-1 (méthode simplifiée) comme étant :

$$U_w = \frac{A_g U_g + l_g \psi_g + A_f U_f}{A'}$$

Avec :

- $A_g$  : Aire du vitrage ( $\text{m}^2$ ).
- $U_g$  : Transmission thermique du vitrage ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ).
- $l_g$  : Périmètre du vitrage (m).
- $\psi_g$  : Coefficient de transmission linéique de la jonction du vitrage et du cadre ( $\text{W}/\text{mK}$ ).
- $A_f$  : Aire du cadre ( $\text{m}^2$ ).
- $U_f$  : Transmission thermique du cadre ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ).
- $A'$  : Aire de la fenêtre ( $\text{m}^2$ ).

Le coefficient linéique de transmission thermique  $\Psi_g$ , est exprimé de la manière suivante selon la norme NF EN ISO 10077-2 :

$$\Psi = L_{\Psi}^{2D} - U_f b_f - U_g b_g$$

Le terme  $L_{\Psi}^{2D}$  désigne le coefficient de couplage thermique bidimensionnel qui est déterminé par un calcul numérique aux éléments finis sur un logiciel adapté, le détail du calcul ne rentre pas dans le cadre de ce rapport.

- Transmission Lumineuse totale :  $g$

Il s'agit de la transmission totale à travers la fenêtre en tenant compte de la surface de la vitre et du cadre.

$$g = \frac{g_v \cdot A_v + g_c \cdot A_c}{A'}$$

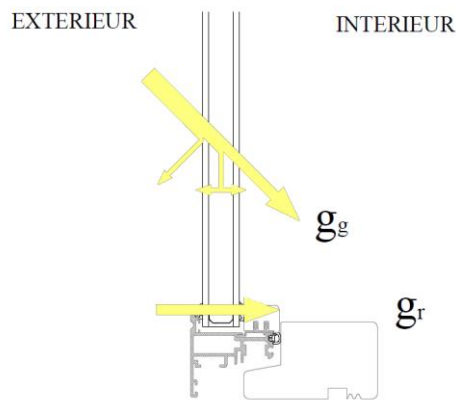


Figure 31 : Transmission lumineuse total.

La transmission à travers le cadre  $g_c$  est considérée comme négligeable. Ceci nous amener à remarquer que seulement deux facteurs influencent la transmission lumineuse totale reçue :

- L'épaisseur du cadre (donc surface de vitrage)
- Transmission lumineuse à travers la fenêtre

## 2.4 Le bilan énergétique

Nous venons d'aborder le calcul des besoins en énergie d'un bâtiment, et nous allons maintenant définir le bilan énergétique<sup>xvii</sup>. Le bilan énergétique est l'ensemble des apports et déperditions pour un local ou bâtiment donné. La Figure 32 schématise le bilan énergétique dans son ensemble pour un bâtiment ou zone donnée.

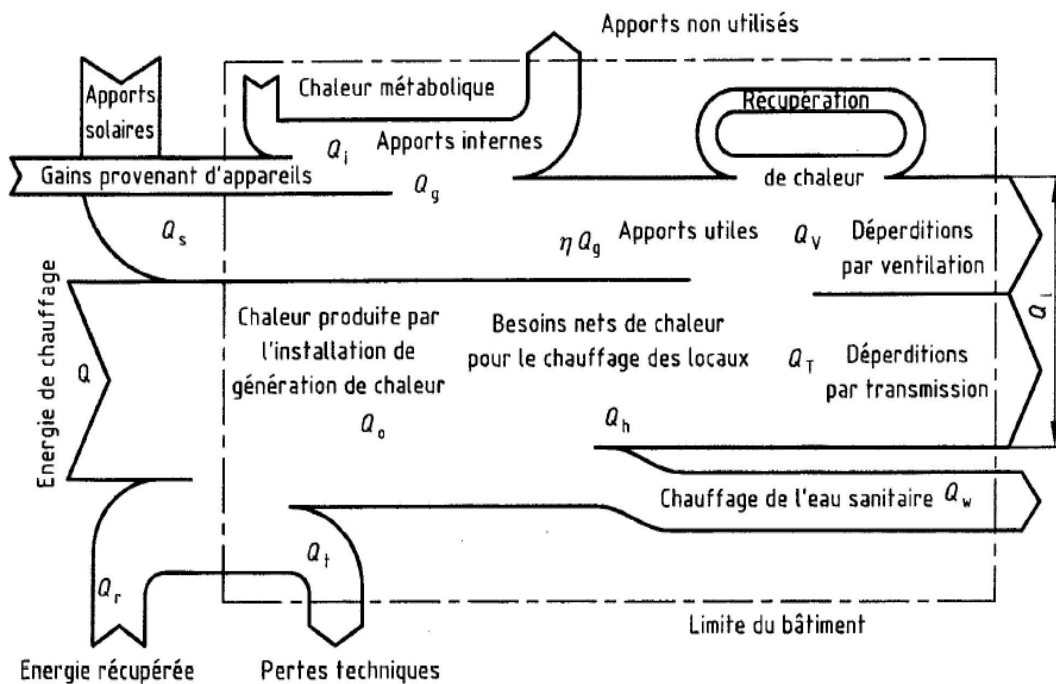


Figure 32 : Bilan énergétique d'un bâtiment, (NF EN 832).

Nous avons :

- $Q$  : Besoins énergétiques pour le chauffage
- $Q_{oa}$  : Chaleur provenant d'autres appareils
- $Q_r$  : Énergie récupérée
- $Q_{hs}$  : Pertes du système de chauffage
- $Q_m$  : Chaleur métabolique
- $Q_s$  : Apports solaires passifs
- $Q_i$  : Apports internes
- $Q_g$  : Apports totaux
- $\eta Q_g$  : Apports récupérés
- $Q_h$  : Besoins en chauffage
- $Q_v$  : Déperdition par renouvellement d'air
- $Q_{vr}$  : Chaleur récupérée par système de ventilation
- $Q_T$  : Déperdition par transmission
- $Q_{ww}$  : Chaleur pour préparation de l'eau chaude
- $Q_L$  : Déperditions totales

Dans un bâtiment passif nous voulons limiter au minimum les échanges de chaleur entre la zone habitable et l'extérieur tout en ayant des besoins en énergie minimales pour garantir les besoins en confort des personnes. Ceci nous amène à la question suivante : quelles sont les performances minimales à atteindre pour une maison passive ?

## 2.5 De l'énergie primaire à l'énergie finale

Nous définissons les termes énergie primaire et énergie finale de la manière suivante :

- L'énergie primaire est l'énergie utilisée à la centrale de la production énergétique et elle varie suivant les sources utilisées (nucléaire, thermique, photovoltaïque ...).
- L'énergie finale est celle qui arrive directement au consommateur, lue sur le compteur électrique.

La distinction entre les deux types d'énergie provient du fait que la production et la distribution d'énergie engendrent des pertes. Nous pouvons citer des pertes sur les lieux de transformation même, pertes de transformation et des pertes de production. Cette énergie doit transiter par un réseau avant d'arriver sur son lieu de consommation à travers un circuit schématisé sur la Figure 33.

Nous allons décomposer la production énergétique Française, telle qu'elle est décomposée sur la facture d'électricité qu'un particulier reçoit. La plus grande partie de l'énergie produite en France est d'origine nucléaire avec un rendement de 33%, (seulement 1/3 du combustible est transformé en électricité)

Mais l'électricité primaire n'est pas seulement nucléaire en France, elle est composée d'autres sources d'énergie primaire selon le Tableau 3. Ceci nous donne un rendement global pour l'électricité produite en France de 43,5 %, si nous tenons compte des pertes de distribution sur le réseau de 5%, nous avons un rendement de 38,5 %, soit une conversion de 2,58. C'est-à-dire que pour 1 kWh électrique utilisé par un consommateur, il faut en produire 2,58 kWh.

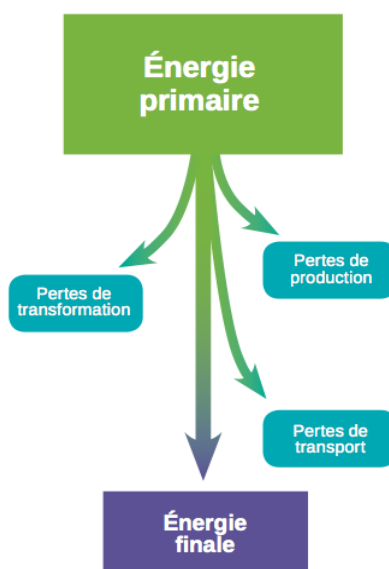


Figure 33 : Évolution de l'Énergie Primaire en Énergie Finale (RT 2012).



Dans le contexte des maisons passives, il n'est pas admis de se servir d'une production photovoltaïque montée sur le toit de la maison pour palier des appareils gourmands en énergie. Ceci oblige le concepteur à optimiser les besoins énergétiques du bâtiment car nous parlons d'une consommation d'énergie primaire maximale de 120 kWh /m<sup>2</sup> annuels et de seulement 48,5 kWh /m<sup>2</sup> annuels en énergie finale pour la France.

Type d'Énergie	Rendement (%)	Part de la Production (%)
Nucléaire	33	75
Énergies Renouvelables	100	15
Énergies Fossiles	100	10

Tableau 3. : Composition de l'électricité en France (Edf 2009).

## 2.6 Du régime permanent au régime dynamique

Les règles de calcul que nous avons détaillées auparavant décrivent les échanges de chaleur d'un bâtiment sous forme de régime permanent, c'est-à-dire que les échanges sont calculés pour un temps T, sous des conditions qui sont prises comme les plus défavorables bases sur une connaissance sur plusieurs années des conditions météorologiques.

Un calcul en régime permanent du fait que ce mode trouve ses limites par le fait que cela ne prend pas en compte les fluctuations journalières des phénomènes météorologiques, fluctuations de température, d'hygrométrie, variation du vent etc. C'est ce que nous permet un calcul en simulation thermique dynamique.

Le cœur d'une simulation thermique dynamique est le moteur de calcul, pour les besoins de notre mémoire, nous utilisons EnergyPlus. La Figure 34 est le schéma de fonctionnement. Le calcul est décomposé en « modules », chacun menant à un calcul spécialisé, les résultats sont rapatriés dans le moteur de calcul qui les intègre dans une solution « totale ».

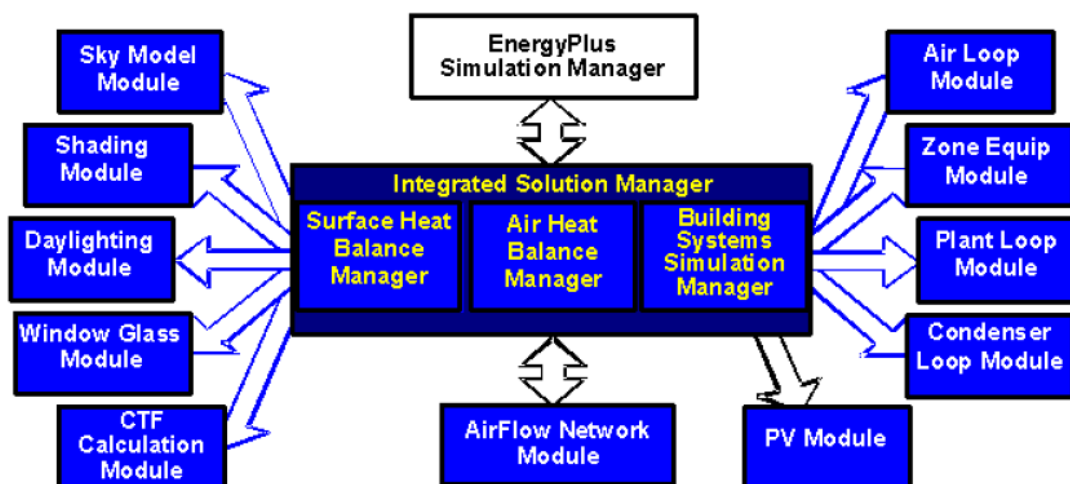


Figure 34 : Principe de modélisation dynamique avec le moteur de calcul EnergyPlus

Ce type de calcul complexe nous permet d'étudier un bâtiment sur un pas de temps donné (de 10 secondes à une journée) sur une année complète. Nous sommes loin du calcul en régime permanent, la complexité du calcul et la quantité d'informations produites en font un outil de conception extrêmement précis.

## Chapitre 3

### Étude d'une maison passive : site, climat et données de modélisation

Le logiciel utilisé pour les besoins du calcul est en fait deux logiciels distincts. Nous avons une interface graphique, DesignBuilder qui permet de modéliser et définira les différents paramètres du bâtiment, et nous avons un moteur de calcul, EnergyPlus qui lui intègre les algorithmes de calcul. L'interface DesignBuilder intègre aussi une bibliothèque de composants verriers, qui est une base de données régulièrement mis à jour par les fabricants eux-mêmes pour les besoins de calculs.

Nous utilisons pour le besoin des calculs dans ce mémoire les logiciels suivants :

- Interface Graphique : Design Builder – version 3.2.0.003
- Moteur de Calcul : Energy Plus – version 7.2.0.006 (DLL et Exécutable)

Bases de données :

- Météorologiques : Météo Plus – version 7.1.19.28684
- Produits verriers : International Glazing Data Base – version 25

Loin de vouloir être une norme, le label Passivhaus a néanmoins des coefficients de transmissions minimales à respecter (garde fous), un objectif d'étanchéité à l'air à respecter et une consommation d'énergie primaire maximale à respecter.

- Méthodologie de l'analyse

Lors de la modélisation de notre bâtiment, nous allons nous rapprocher le plus près possible des coefficients de base. Nous nous servirons de ces résultats comme référence pour pouvoir déterminer les avantages de toute modification pris en compte (épaisseur de l'isolant, vitrage, gaz de remplissage etc.)

#### 3.1 Site et climat

Une analyse pertinente du site et du climat où se situe un projet permettra de cibler en amont les priorités de la conception d'un bâtiment. Par exemple, un projet peut être exposé à un vent dominant ouest, donc nous cherchons à protéger le pignon ouest de la construction par une plantation qui pourra protéger le bâtiment des pluies et vents.

La Figure 35 représente le plan du cadastre sur lequel sera implanté le bâtiment, le terrain est le lot 114. Il s'agit d'un plot de 2 500 m<sup>2</sup> en milieu rural qui ne reçoit aucun ombrage de la part des bâtiments (tous de plein pied), ou d'éléments végétaux tels que des arbres.

Mais pour ce type d'analyse, la pertinence des données météorologiques est primordiale, d'autant plus que nous sommes dans le cadre d'une simulation thermique dynamique, calcul sur une année complète au pas horaire.

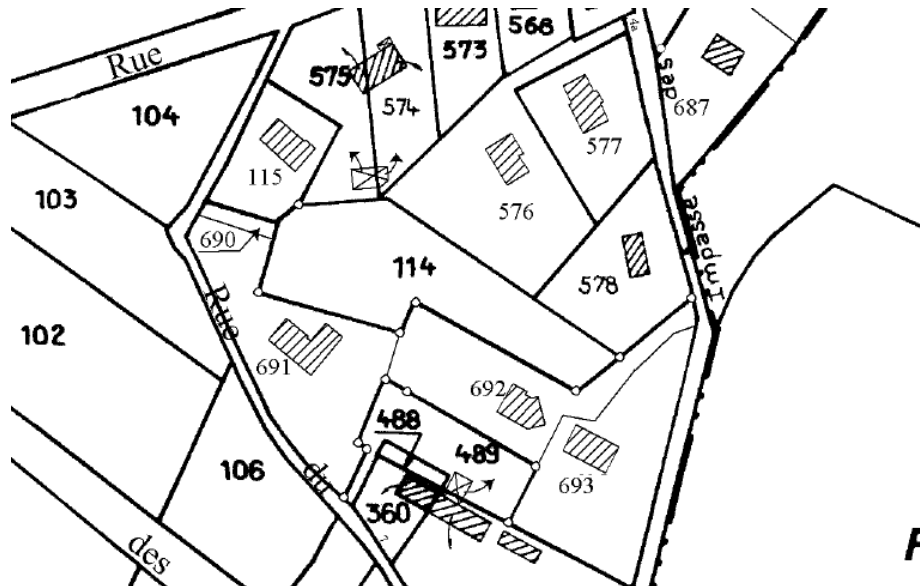


Figure 35: Plan cadastral, lot 114, lieu-dit « la Cote » 76560 Etalleville, Haute Normandie

Le projet se situe en Haute Normandie dans le département de la Seine Maritime, les données géographiques sont les suivantes :

- Latitude : 49.73 °N
- Longitude : 0.83 °E
- Altitude : 123 m

Il n'y a pas de station météorologique à proximité du site, pour avoir une base de données viable, le logiciel Meteonorm<sup>xviii</sup> est capable de fournir ces données à partir d'une interpolation des 6 stations météorologiques à proximité :

- Dieppe - 29 km
- Rouen/Boos (AUT) - 46 km
- Le Havre/Octeville - 61 km
- Abbeville (AUT) - 84 km
- Beauvais/Tille - 97 km
- Évreux/Fauville (FAF) - 85 km

Les données sont basées sur une moyenne de la période 2000 – 2009, le rayonnement solaire sur une période de 1986 – 2005. Le logiciel crée un fichier météo sous format *.epw* qui sera utilisé par le logiciel de simulation ou un logiciel d'analyse de données météorologiques.

Nous avons un climat type marine côtière, un été chaud (sans extrêmes), des hivers plutôt doux (18 km de la cote) et les précipitations distribuées tout au long de l'année sans période

spécifique, ce à quoi nous nous attendons d'un climat typiquement Normand, (Figure 36, Figure 37 et Figure 38).

- Été : juin à août

La période où les températures extérieures sont maximales est du 17 au 23 août avec une température maximale de 28,5 °C (déviations de 9,079 °C).

La semaine type en été (proche de la moyenne) est du 22 juin au 28 juin avec une température moyenne de 17,04 °C (déviations de 0,114 °C).

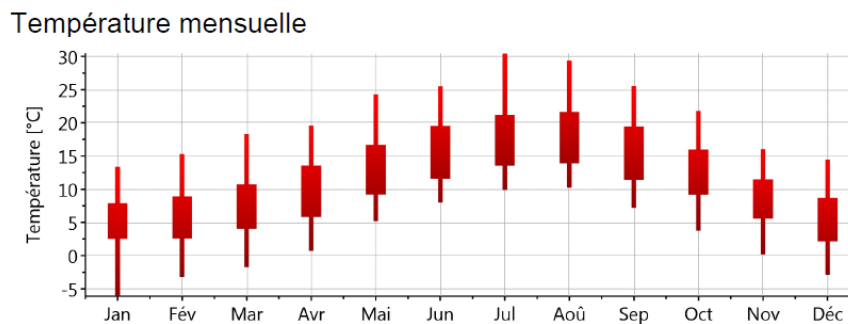


Figure 36 : Températures mensuelles (Meteonorm).

- Hiver: décembre à février

La période la plus extrême est du 13 janvier au 19 janvier avec une température minimale de -4,30 °C (déviations de 6,158 °C).

La semaine type en hiver (proche de la moyenne) est du 1er au 7 décembre avec une température moyenne de 5,18 °C (déviations de 0,612 °C).

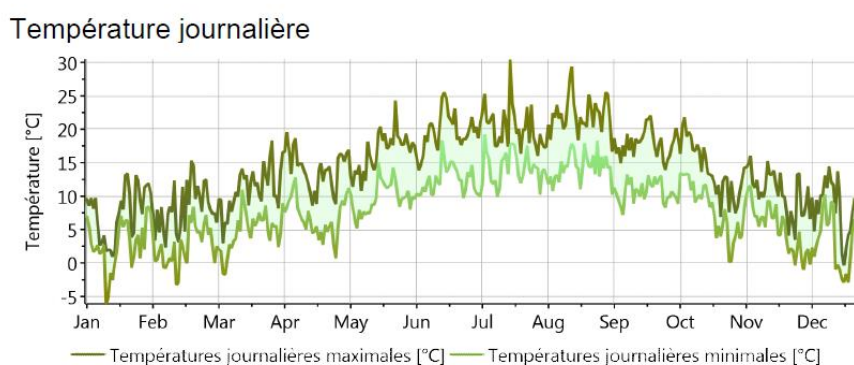


Figure 37 : Températures journalières (Meteonorm).

- L'Automne : septembre à novembre

La semaine type en Automne (proche de la moyenne) est du 8 au 14 septembre avec une température moyenne de 11,98 °C (déviations de 1,070 °C).

- Le Printemps : mars à mai

La semaine type en Printemps (proche de la moyenne) est du 12 au 18 septembre avec une température moyenne de 9,99 °C (déviations de 0,069 °C).

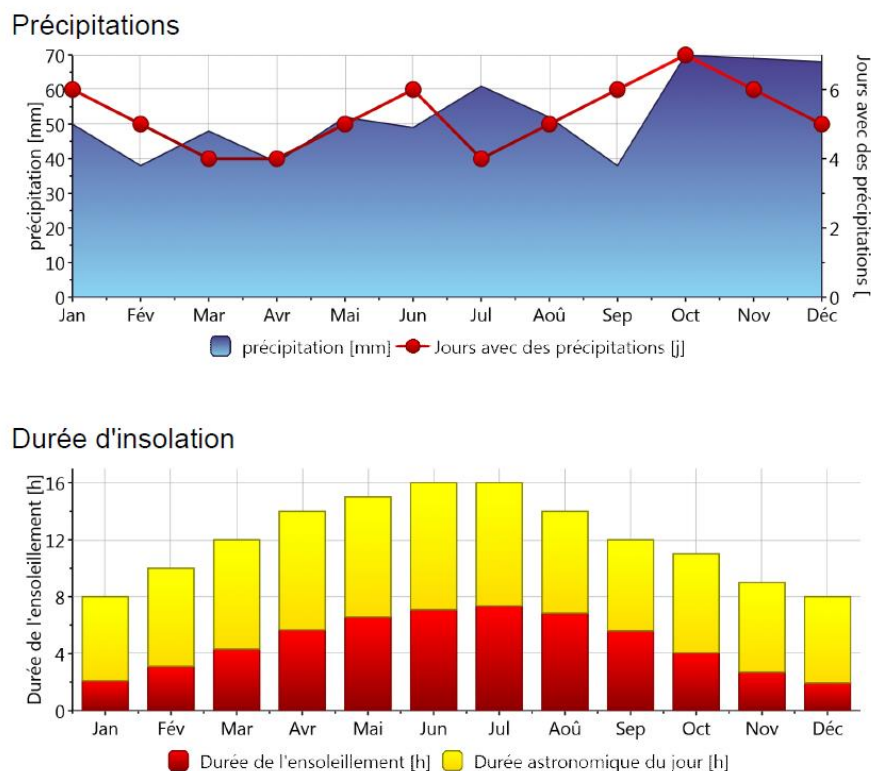


Figure 38 : Précipitations et durée d'insolation (Meteonorm).

- Conclusions sur l'analyse du climat

À travers l'analyse du climat nous pouvons en déduire certains points de conception du bâtiment :

- Les gains de chaleur par les équipements et les occupants réduiront les besoins de chaleur nécessaire au chauffage si la maison est correctement isolée.
- Le vitrage devra minimiser les gains et les pertes par conduction (un facteur  $U_w$  minimum), car toute perte par rayonnement ou conduction aura un impact sur le climat intérieur.
- Une inertie thermique réduite permettra de répondre plus rapidement aux demandes de confort.

- Une sur-isolation peut devenir économiquement viable avec un temps de retour intéressant.
- Tout gain par le vitrage peut être bénéfique mais une étude plus approfondie devra être menée suivant l'orientation de la façade.
- Les grandes surfaces vitrées devront être protégées le soir pour minimiser les pertes de chaleur par transmission (volets, stores ou rideaux lourds).

## 3.2 Modélisation

### 3.2.1 Géométrie

Le bâtiment est un simple rectangle de 20 m de long et 8,5 m de large. Il est divisé en deux appartements distincts et conçu dans le but d'offrir à deux jeunes couples avec un jeune enfant la possibilité de louer un logement ayant un coût d'exploitation le plus faible possible. Le choix d'une conception passive se justifie dans le sens où les coûts de chauffage seront le plus bas possible tout en offrant un confort optimal. D'autres moyens d'économie seront mis en œuvre (comme la récupération des eaux de pluie) mais ceci ne rentre pas dans le cadre de ce mémoire.

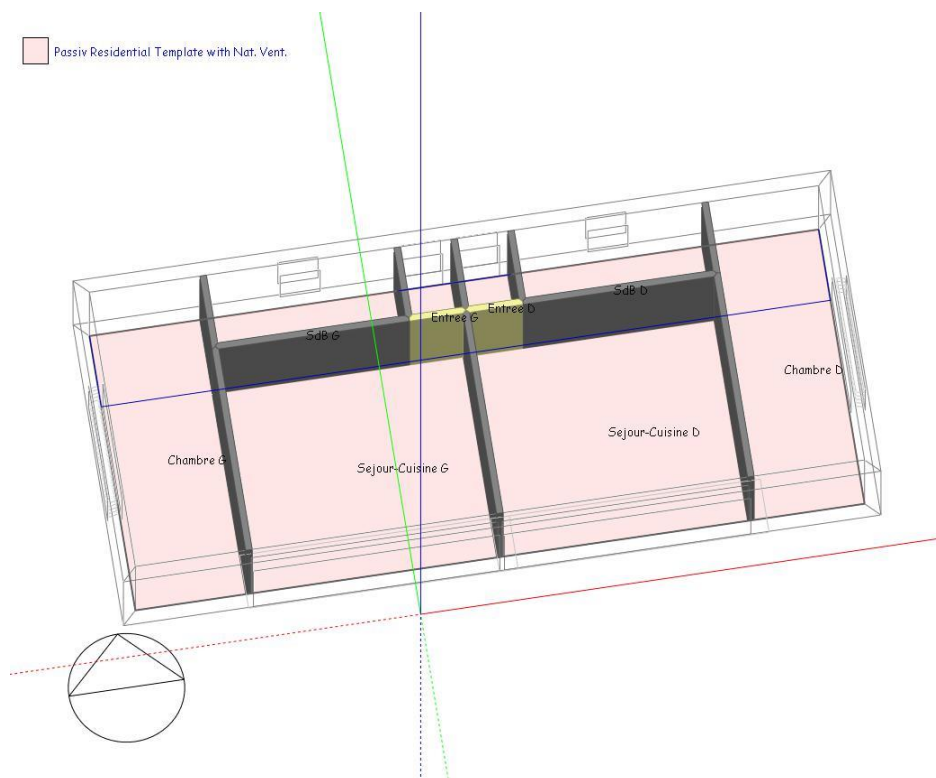


Figure 39 : Modélisation du bâtiment sous Design Builder.

Nous avons donc deux appartements de 73 m<sup>2</sup> chacun, accolés. Le plan est simple, deux chambres, une salle de bain et une cuisine/séjour où les familles passeront la plupart du temps.

Pour les besoins du calcul, nous devons clairement établir un zoning en fonction de l'occupation de la pièce et l'orientation de la façade.

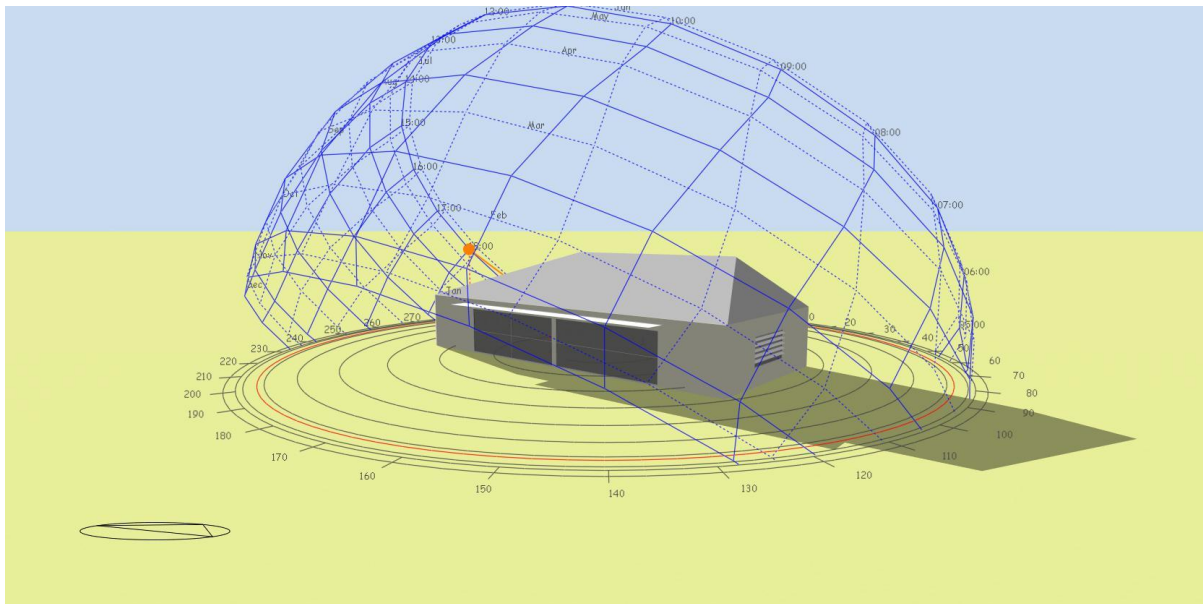


Figure 40 : Visualisation externe du modèle.

Par exemple, un séjour ne sera pas utilisé de la même manière qu'une salle de bains, les activités physiques ne seront pas les mêmes (dégagements de chaleur et besoins en confort) et les différences seront aussi dans les apports de chaleur (soit dus aux vitres par exemple). Nous avons défini les zones suivantes :

- Salon/Séjour - Sud
- Chambres – façade principale Est ou Ouest
- Salle de Bains - Nord
- Entrée - Nord

Sur le modèle informatique les chambres sont regroupées en une seule, la différence de la séparation des deux pièces par une cloison est considérée comme négligeable dans notre cas.

L'entrée de l'appartement est située au Nord et forme un sas pour éviter au maximum les déperditions par la porte d'entrée, la salle de bains suit cette orientation car n'étant pas considérée comme une pièce principale de vie

### 3.3 Performances minimales d'une maison passive

La performance énergétique du bâtiment est primordiale dans une conception dite passive, les performances dépendent des composants de l'enveloppe et des systèmes de ventilation et de chauffage, les minima sont résumés dans Tableau 4.

La valeur cible de consommation énergétique primaire maximale à respecter est de 120 kWh /m<sup>2</sup> an en énergie primaire. Nous aborderons la distinction entre l'énergie primaire et l'énergie finale dans le sous chapitre suivant 2.5.



Performances minimales atteindre pour une maison passive	
Besoins en Chauffage ou Charge maximale admissible pour les besoins en Chauffage	$\leq 15 \text{ kWh /m}^2 \text{ an}$ $\leq 10 \text{ W/m}^2$
Besoins en Froid Demande en Énergie Primaire Étanchéité à l'Air de l'ensemble	$\leq 15 \text{ kWh /m}^2 \text{ an}$ $\leq 120 \text{ kWh /m}^2 \text{ an}$ $\leq 0.6 \text{ vol/heure @ Q 50 pascals}$ ( $n_{50}$ )
Performances Minimales des Composants de l'Enveloppe	
Coefficient U des Fenêtres Coefficient g des Assemblages Vitrés Coefficient U des Fenêtres installées Étanchéité à l'Air de l'assemblage Mur/Fenêtre	$\leq 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\geq 0.5$ $\leq 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\leq 2.25 \text{ m}^3/\text{h.m @ Q 100 pascals}$ ( $n_{100}$ )
Coefficient U Murs Coefficient U du Plancher en contact avec le Sol Coefficient U du Toit Ponts Thermiques $\psi$	$\leq 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\leq 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\leq 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\leq 0.01 \text{ W/m K}$
Performance du Système de Ventilation	
Efficacité minimale de la Récupération d'Énergie Consommation Maximale du moteur	$\geq 75\%^*$ $\leq 0.15 \text{ Wh/m}^3$
Critères de confort	
Critères d'inconfort : surchauffe Niveau bruit admissible ventilation Transmission de son à travers les parois	$>25^\circ\text{C} \leq 10\%$ de l'année 35 dB(A) 25 dB(A)

Tableau 4 : Performances minima à respecter pour une maison passive.

Nous pouvons aussi remarquer la faible valeur pour les ponts thermiques,  $\psi = 0.01 \text{ W/mK}$ , ce qui nous conduit à considérer cette valeur comme quasi nulle. Cela impose donc une conception de l'enveloppe avec un isolant sans interruption comme nous avons pu le constater lors des remarques sur les ponts thermiques dans le sous chapitre 1.4 p 25.

Une autre remarque importante à faire concerne la valeur de coefficient de transmission des parois qui est de  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ , une valeur très faible par rapport à un bâtiment traditionnel et ceci nous impose des critères de sélection des systèmes constructifs particuliers au vu des épaisseurs d'isolant requis.

### 3.3.1 Système de ventilation et débits d'air

Le sujet de ce mémoire est l'optimisation des composants de l'enveloppe d'une maison passive, mais nous devons aussi tenir compte de la manière la plus précise possible des autres facteurs influençant la consommation énergétique comme les systèmes de ventilation et les débits d'air.

Pour une étude précise des systèmes mécaniques, comme le cycle de compression/ détente d'une pompe à chaleur ou l'efficacité réelle de l'échangeur thermique, nous devons passer par d'autres logiciels qui sont mieux adaptés à ce type d'analyse. Mais nous devons décrire ces systèmes de manière précise pour ne pas rendre inutilisable les résultats.

○ Système de Ventilation Mécanique

Dans une maison dite « classique » un système de ventilation double flux est entièrement suffisant pour les besoins d'hygiène et de confort, le mode de chauffage est en général indépendant de la VMC. Dans une maison passive, le système de ventilation est le véritable cœur de l'habitat, il doit fournir un air neuf en continu tout au cours de l'année et minimiser la consommation énergétique tout en apportant un confort optimum, la ventilation et le chauffage sont liés.

L'enveloppe étanche protège efficacement des déperditions calorifiques, mais pour arriver au seuil de consommation énergétique demandé dans les recommandations passivhaus nous devons aussi limiter les déperditions par renouvellement d'air du système de ventilation. C'est pour cela que tout système de ventilation passif doit avoir un système d'échange de chaleur afin de récupérer le maximum de calories de l'air refoulé.

	Nilan Compact P	Modélisation (par logement)
Débit d'air. (CP)	172 m <sup>3</sup> /h	Cible 172 m <sup>3</sup> /h
Puissance Thermique (DC)	3 kW	2.11 kW (calcul)
Rendement Échangeur (CP)	$\eta_{WRG,eff} = 80\%$ à 172 m <sup>3</sup> /h	$\eta = 80\%$
COP chauffage (CP)	Moyenne 3.13	3.13

Tableau 5 : Données pour la modélisation de la pompe à chaleur Nilan Compact P.

Nous avons choisi un système adapté à une utilisation en maisons passives, le Compact P<sup>xix</sup>. Cet appareil est intéressant à plusieurs points de vue car outre le fait d'être spécifiquement conçu pour des maisons (ou logements) passifs, il incorpore les éléments suivants :

- Ventilation avec récupération de chaleur active et passive.
- Chauffage centrale par pompe à chaleur (options géothermie ou aérotherme).
- Production d'eau chaude sanitaire.
- Chauffage et Rafraîchissement (si besoin est).

Le **Tableau 5** résume les caractéristiques techniques du Compact P et les données d'entrée pour la modélisation sur logiciel. La Figure 41 sont les courbes de performance du moteur du système, nous pouvons remarquer de très bons rendements même à des températures extérieures négatives (COP de 6 pour un débit de 172 m<sup>3</sup>/h et -5°C extérieur).

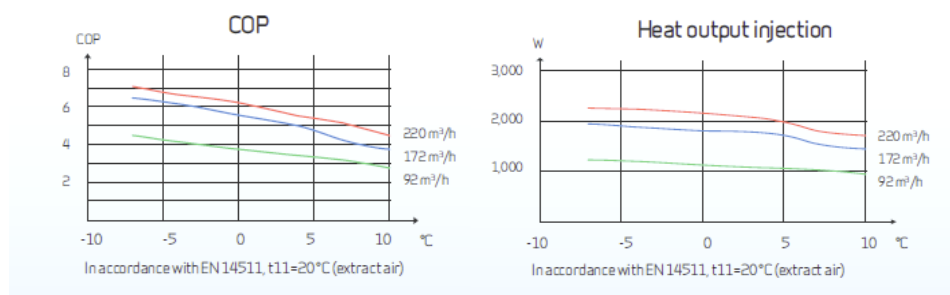


Figure 41 : Spécifications techniques du Nilan P, selon EN 14511(NILAN)

Pour compenser les pertes de réseau (réseau aéraulique, filtres à pollen etc.) il sera souhaitable de préférer un débit supérieur aux débits minimaux, les pertes de calories dues aux débits supérieurs seront partiellement compensées par l'échangeur sur les flux entrant et sortant. Les débits d'air pris en compte pour la modélisation sont fournis dans Tableau 6.

Pièce	Surface m <sup>2</sup>	Débits l/s m <sup>2</sup>	Débit m <sup>3</sup> /h
Chambres	23.3	0.357	30
Entrée	3.0	2.03	22
SdB	10.3	0.808	30
Séjour/Cuisine	38.1	0.656	90
		Total	172

Tableau 6 : Débits d'airs maximaux pris en compte.

### 3.3.2 Infiltration

L'infiltration dans les logements et leur modélisation constituent un des domaines les plus complexes et incertains pour la modélisation d'un bâtiment selon le référentiel du moteur de calcul d'Energy Plus<sup>xx</sup>. Ce dernier doit prendre en compte les hypothèses suivantes :

Tout air extérieur qui rentre par infiltration sera automatiquement mélangé à l'air dans le bâtiment. La quantité d'infiltration sera assimilée à des Changements d'Air par Heure (CAH ou ACH en anglais), c'est-à-dire le nombre de volumes d'une pièce donnée qui sera renouvelée par heure.

Energy Plus a trois modèles d'infiltration intégrés directement à son moteur de calcul, et nous allons nous servir du plus simple pour les besoins de notre modèle, il s'agit du modèle décrit ci-dessus, le taux de renouvellement par heure. Ce modèle nous permet de définir un débit qui sera modifié par des différences de température, la pression extérieure et la vitesse du vent. C'est une approche simplifiée d'un phénomène complexe, mais ce modèle est utilisé couramment pour les besoins de calcul.

Pour les besoins du modèle, nous allons prendre un taux d'infiltration de 0.35 Vol/heure, valeur pénalisante certes, mais qui devra être ajustée après des tests in situ lors de la construction suite à un « blower door test ».

### 3.3.3 Les murs

Nous allons prendre en compte pour les besoins de notre étude trois types de murs, tels ceux utilisés pour la construction d'une maison passive aujourd'hui. Nous allons distinguer le système porteur et les isolants utilisés :

- Type 1 : Construction en bois, avec l'utilisation de poutrelles ajourées en I et l'utilisation d'un isolant en fibre de bois.
- Type 2 : Construction en bois, avec l'utilisation de panneaux en bois massif lamine et l'utilisation d'un polystyrène expansé comme isolant.
- Type 3 : Construction en massif avec des blocs de béton léger et l'utilisation d'un isolant à partir de polystyrène extrudé.

#### ○ Mur Type 1

Il s'agit du mur en bois le plus couramment utilisé, le détail du mur est donné dans le tableau suivant (**Tableau 7**) et les déclinaisons en **Tableau 8**.

Matériaux	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Épaisseur m	Conductivité W/mK
Bardage Bois	45	0.023	0.039
Lame d'air		0.015	
Isolant Rigide Fibre de Bois		0.04	
Panneaux Bois	160	0.022	0.041
Isolant Souple Fibre de Bois		variable	
Panneaux Bois		0.022	
Panneau Gypse		0.013	

Tableau 7 : Détail assemblage mur Type 1

Type	Épaisseur de l'Isolant m	Coefficient U de l'ensemble W/m <sup>2</sup> K
1a - Reference Passivhaus	0.2	0.145 < 0.15
1b	0.25	0.124
1c	0.3	0.108
1d	0.175	0.161

Tableau 8 : Déclinaisons du mur Type 1.

- Analyse du risque de condensation

Le logiciel nous permet de faire une rapide analyse de risque de condensation dans la paroi, ceci sera autant plus nécessaire que la fibre de bois n'est pas étanche à la vapeur d'eau et toute condensation qui se forme sera au détriment des performances et de la longévité de la paroi. Cette analyse est basée sur les caractéristiques des matériaux eux-mêmes, celle de la résistance au flux de chaleur et la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau<sup>xxi</sup>.

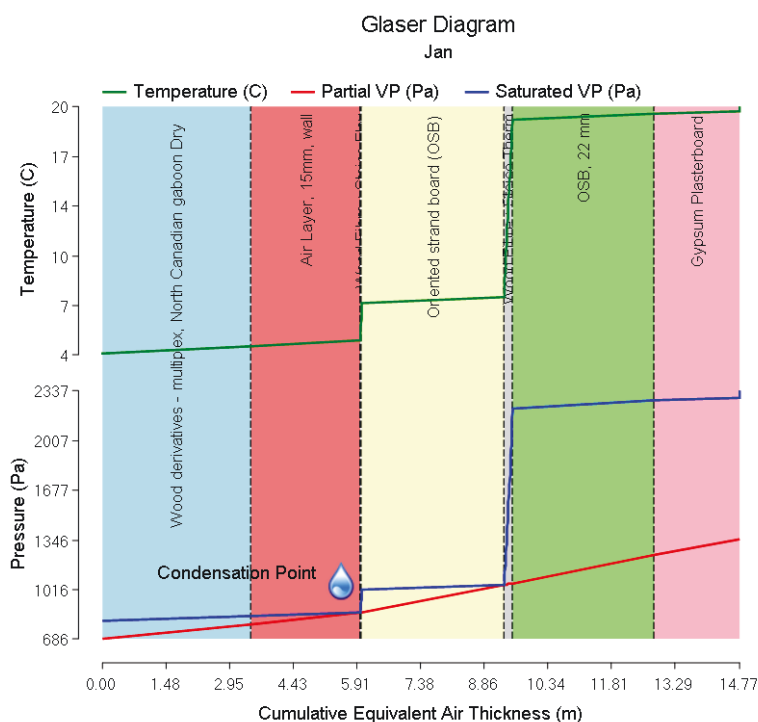


Figure 42 : Diagramme de Glaser édité par le logiciel Design Builder

La Figure 42 nous indique qu'il y a effectivement un risque de condensation à l'interstice de la face extérieure de l'isolation. Ceci est dû principalement aux caractéristiques physiques de l'isolant qui n'offre pas une grande résistance à la diffusion de vapeur d'eau, c'est-à-dire que la laine de bois est un matériau qui respire. Il est donc essentiel de prévoir soit un par vapeur sur la face la plus interne de l'isolant (avant les plaques de plâtre) ou une lame d'air à la face extérieure.

- Mur Type 2

Nous avons pris en deuxième position un autre type de mur en bois qui a la particularité d'être entièrement prémontré en usine et simplement gruté et assemblé sur place. La structure porteuse est composée de deux panneaux en bois massif laminés, l'isolant est un polystyrène extrudé qui a la particularité d'offrir une très grande résistance thermique, un simple enduit est appliqué sur ce dernier sur la face extérieure du mur.

Le résumé des composants du mur est donné en Tableau 9 et les déclinaisons en Tableau 10, la même méthodologie de déclinaison est appliquée que pour le mur Type 1.

Matériaux	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Épaisseur m	Conductivité W/mK
Enduit de Façade	2100	0.019	
Polystyrène Extrudée	55	variable	0.029
Panneaux Bois Massif Laminé	490	0.04	0.13
Panneau de Gypse		0.013	

Tableau 9 : Détail assemblage mur Type 2.

Nous n'avons pas de risque de condensation car le polystyrène extrudé (ou expansée) est totalement imperméable à la vapeur d'eau, néanmoins une attention devra être apportée lors de l'assemblage sur site par temps pluvieux et à une ventilation correcte des locaux.

Type	Épaisseur de l'Isolant m	Coefficient U de l'ensemble W/m <sup>2</sup> K
2a - Reference Passivhaus	0.17	0.148 < 0.15
2b	0.22	0.118
2c	0.27	0.098
2d	0.15	0.165

Tableau 10 : Déclinaisons mur Type 2.

○ Mur Type 3

Nous avons inclus un mur maçonné car il représente bien les avantages tant par la mise en œuvre que par la technologie de ce type de mur. Tableau 11 Tableau 12

Matériaux	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Épaisseur m	Conductivité W/mK
Enduit de Façade	2100	0.019	
Polystyrène Expansé	37.5	variable	0.034
Blocs de Béton Leger	400	0.20	0.1
Panneau de Gypse		0.013	

Tableau 11 : Composants mur Type 3

Tout comme les murs précédents, nous avons défini les composants dans le Tableau 11 et les déclinaisons en Tableau 12. Nous avons défini 4 variations sur ce système constructif en jouant sur l'épaisseur de l'isolant de polystyrène expansé :

Type	Épaisseur de l'isolant m	Coefficient U de l'ensemble W/m <sup>2</sup> K
3a - Reference Passivhaus	0.15	0.151 ≥ 0.15
3b	0.20	0.124
3c	0.25	0.105
3d	0.12	0.174

Tableau 12 : Déclinaisons mur Type 3.

Le mur est composé de blocs de béton léger (meilleure performance thermique par rapport à un parpaing normal) et l'isolant est un polystyrène extrudé. Ce dernier s'avère plus aisé de fixer sur le support béton à l'aide d'une colle adaptée plutôt qu'un isolant plus classique qui nécessitera des chevrons et un treillis pour le fixer sur le support.

Nous n'avons pas de risque de condensation sur ce type de mur car un autre avantage du polystyrène extrudé (ou expansé) est d'être totalement imperméable à la vapeur d'eau.

### 3.3.4 Les fenêtres

Les parois transparentes sont composées de deux parties distinctes, l'ensemble vitré et le châssis qui encadre ce dernier, offrant support et résistance en flexion. Nous allons prendre des hypothèses simplificatrices quant aux propriétés de l'ensemble composé du châssis et du cadre.

- Les châssis de fenêtre

Nous allons modéliser le même cadre pour chaque type de vitrage, il s'agit d'un cadre en PVC avec un remplissage rupteur de pont thermique, l'ensemble a un coefficient de transmission thermique suivant :

$$U_{ch\grave{a}ssis} = 0.78 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Il s'agit d'un cadre aux performances de base requis pour une certification Passivhaus, une étude plus détaillée pour une éventuelle optimisation nécessitera un calcul bidimensionnel aux éléments finis mais ceci ne rentre pas dans l'objet de notre mémoire.

L'hypothèse simplificatrice que nous prenons est due au fait que nous allons assumer les pertes linéiques aux interfaces suivants<sup>xxii</sup> :

- cadre/vitrage,
- intercalaire/cadre,
- cadre/mur.

Nous allons prendre comme perte linéique :

$$\psi_{bord} = 0,03 \text{ W/mK}$$

Ce qui nous donne pour une fenêtre  $U_{fenetre} = 0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$  de dimensions 1.23 m x 1.48 m une valeur totale :

$$U_{f,total} = 0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$$

○ Le triple vitrage

Pour être conforme à une certification Passivhaus et au minima requis nous devons absolument avoir un triple vitrage qui aura une valeur maximale de  $U_{fenetre} = 0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$  comme nous l'avons vu précédemment dans le Chapitre 2.

Un triple vitrage est composé de plusieurs types de fenêtres, un gaz de remplissage et d'un intercalaire pour maintenir le tout. C'est en modifiant les types de fenêtres et le gaz de remplissage que nous pouvons obtenir des assemblages vitrés aux performances énergétiques des plus intéressantes.

Les variations sur les triples vitrages sont :

- Gaz de remplissage (air, argon et krypton).
- Vitre intermédiaire : transparent ou film réfléchissant la chaleur.
- Largeur du vide entre les vitres.

○ Vitrage Type 1

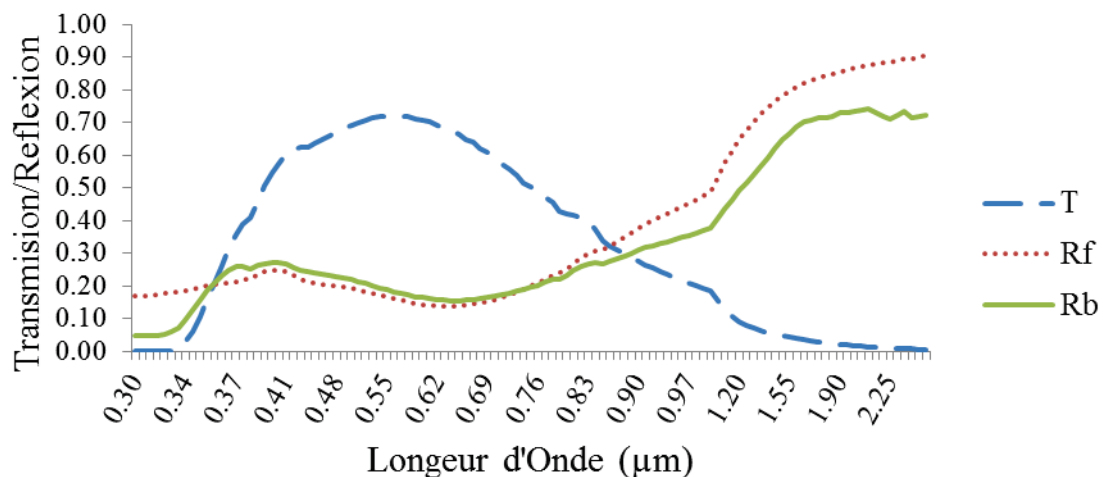


Figure 43 : Propriétés optiques de l'assemblage Type 1.

L'assemblage de base du triple vitrage est le suivant :

- Extérieur - vitrage avec couche basse émissivité : 4 mm.
- Vide : 12 mm.



- Vitrage monolithique transparent : 4 mm.
- Vide : 12 mm.
- Intérieur – vitrage avec couche base émissivité : 4mm

La Figure 43 représente les propriétés optiques de l'assemblage vitré Type 1 (nous ne tenons pas compte du gaz de remplissage). Nous pouvons constater que la transmission se fait largement sur le spectre visible (0,38 à 0,80  $\mu\text{m}$ ). La plus grande partie des UV est effectivement bloquée tandis que les infrarouges (IR) seront partiellement transmis car nous constatons que l'assemblage réfléchit plus le rayonnement IR que les UV et la partie visible du rayonnement.

Nous proposons de décliner ce vitrage sous trois types différents, le **Tableau 13** résume les propriétés de chaque déclinaison :

Nomenclature	Modification Dans Les Intercalaires	Transmission Solaire SHGC	g	U W/m <sup>2</sup> K
Type 1a	Remplissage 2 x Krypton 12 mm	0,515	0,706	0,461
Type 1b	Remplissage 2 x Argon 12 mm	0,522	0,719	0,703
Type 1c	Remplissage 2 x Air 12 mm	0,522	0,719	0,944

Tableau 13 : Déclinaisons vitrage Type 1.

○ Vitrage Type 2

Nous avons le même type de configuration que pour le vitrage Type 1 :

- Extérieur - vitrage avec couche basse émissivité : 4 mm.
- Vide : 12 mm.
- Vitrage monolithique transparent : 4 mm.
- Vide : 12 mm
- Intérieur – vitrage avec couche base émissivité : 4 mm.

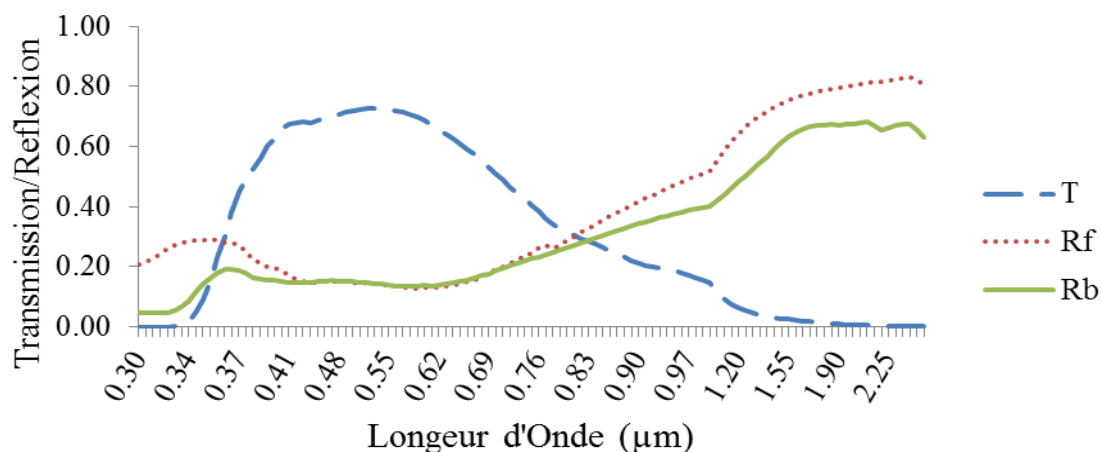


Figure 44 : Propriétés optiques, vitrage Type 2.

La Figure 44 ci-dessus représente les propriétés optiques de l'assemblage vitré Figure 43 Type 2. Bien que composé d'éléments d'un fabricant différent, ce dernier présente quasiment les mêmes propriétés optiques que notre premier exemple. Nous pouvons toutefois remarquer une plus grande réflexion frontale des UV de 10%. Nous verrons, lors des calculs, si cela a une incidence sur les résultats ou non.

Comme nous pouvons le constater les types de vitrages avec une couche basse émissivité, bien qu'ayant a priori les mêmes caractéristiques optiques ont certaines différences. Le vitrage Type 2 réfléchit plus les courtes longueurs d'ondes (entre 0.3 et 0.36 microns) et moins sur la bande 1 à 2,4 microns.

Comme pour le premier vitrage, nous allons décliner cette fenêtre et différentes déclinaisons sont données dans le Tableau 14 suivant:

Nomenclature	Modification Dans Les Intercalaires	Transmission Solaire SHGC	g	U W/m <sup>2</sup> K
Type 2a	Remplissage 2 x Krypton 12 mm	0,497	0,706	0,455
Type 2b	Remplissage 2 x Argon 12 mm	0,496	0,706	0,697
Type 2c	Remplissage 2 x Air 12 mm	0,496	0,706	0,938

Tableau 14 Déclinaisons vitrage Type 2.

○ Vitrage Type 3

Nous allons étudier maintenant des vitrages qui, au lieu d'avoir une vitre claire et transparente entre deux vitrages basse émissivité, comporteront avoir un film suspendu entre deux vitres. Les déclinaisons sont données en Tableau 15 :

- Extérieur - Vitrage avec couche basse émissivité : 4 mm.
- Vide : 12 mm.
- Film suspendu réfléchissant la chaleur
- Vide : 12 mm.
- Intérieur – vitrage clair monolithique : 4 mm.

Nomenclature	Modification Dans Les Intercalaires	Transmission Solaire SHGC	g	U W/m <sup>2</sup> K
Type 3a	Remplissage 2 x Krypton 12 mm	0,301	0,535	0,463
Type 3b	Remplissage 2 x Argon 12 mm	0,300	0,535	0,705
Type 3c	Remplissage 2 x Air 12 mm	0,303	0,535	0,947

Tableau 15 : Déclinaisons vitrage Type 3.

Les propriétés optiques de l'assemblage vitré Type 3 sont schématisées sur la Figure 44Figure 45. Nous pouvons constater que la transmission se fait uniquement sur le spectre du rayonnement visible, les UV et IR sont effectivement bloqués. La plus grande partie des IR est effectivement réfléchie vers l'intérieur (70% à partir de 0.8 microns).

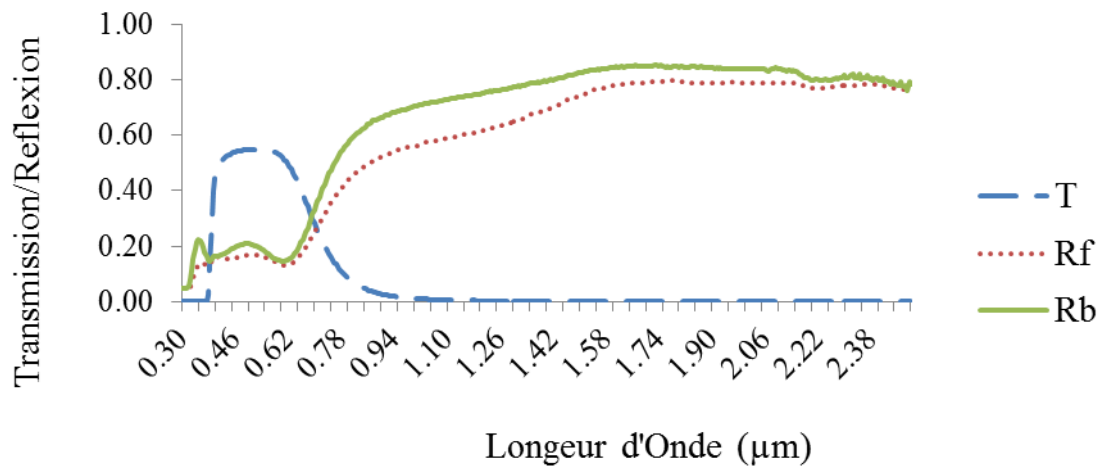


Figure 45: Propriétés optiques de l'assemblage Type 3.

Il est intéressant de constater que nous avons une fenêtre aux propriétés bien différentes de ceux utilisés au préalable. Nous pouvons dire que les types de vitrages avec une couche basse émissivité sont nettement plus répandus dans le milieu du bâtiment. Quant aux vitrages incorporant un film suspendu, ils ne rencontrent pas la même faveur auprès des fabricants de produits verriers.

La courbe de la transmission (en bleu) sur la Figure 45 nous montre la grande sélectivité que peut apporter ce type de vitrage par rapport aux formes d'assemblage vitrées classiques.

### 3.4 Méthodologie de calcul

L'analyse par la simulation thermique dynamique nous permet d'avoir une vision détaillée du comportement thermique d'un bâtiment. Nous pouvons étudier pièce par pièce différents critères influant la performance énergétique ainsi que l'analyse du confort thermique sur une année donnée.

Nous cherchons à concevoir un modèle de base qui nous servira d'étalon de mesure pour valider le bien-fondé ou non de certains choix techniques pour l'enveloppe du bâtiment.

Lorsque nous évoquons une solution « active », nous parlons des systèmes mécaniques de ventilation. Pour une maison passive, le confort est aussi important que la consommation énergétique, mais serait-il souhaitable de pallier tout manquement au confort par un simple système actif. ? Nous allons tenter de répondre à cette question dans notre étude.

La méthodologie de l'étude est divisée en quatre étapes. La première consiste à créer un modèle qui servira d'étalon de mesure pour les étapes suivantes. Nous allons commencer l'optimisation par l'étude de l'élément le moins performant thermiquement, c'est-à-dire les

vitrages. La logique voudra que nous étudions ensuite les brises soleils pour terminer notre optimisation sur les murs.

- Modèle de base.
  - Optimisation des vitrages.
  - Étude des masques solaires.
  - Optimisation des murs.
- Modèle de base

Dans un premier temps, nous allons créer un modèle qui va incorporer les valeurs minimales des coefficients U à respecter, les systèmes de climatisation, les débits d'air et les taux d'occupation journaliers. Une analyse détaillée pièce par pièce devra nous informer sur le comportement général de l'enveloppe (déperditions, apports, pics solaires).

Ceci nous permet de bien vérifier le bien-fondé des hypothèses de base et de valider la conception en vérifiant que nous rentrons bien dans le cadre d'un bâtiment passif. Il faut insister sur le fait que nous devons regarder l'étude dans la double optique des consommations énergétiques et du confort thermique pour pouvoir valider les choix. Le **Tableau 16** suivant résume les hypothèses de calcul qui sont communes à tous les modèles de l'étude.

- Optimisation des vitrages

La première optimisation consiste à étudier les différents types de vitrages. Pour cela nous allons garder les coefficients U des parois opaques du modèle de base et faire varier la quantité de surface vitrée par rapport aux différents types de vitrages. Tableau 16 Ceci est dans le but de faire varier seulement les paramètres qui sont sensibles à notre calcul pour avoir une comparaison.

- Étude des masques solaires

Nous allons étudier en détail l'efficacité d'une protection solaire et étudier quels types de protection seront les mieux adaptés suivant l'orientation de la façade.

Nous avons des brise-soleil de type auvent qui sont plus adaptés à un soleil à la verticale, ce que nous rencontrons surtout sur une façade Sud. Mais il s'agit aussi de proposer un choix optimal pour les façades Est et Ouest.

- Optimisation des Parois Opaques

Tout en conservant le choix des vitrages, nous allons faire varier la surface vitrée par rapport aux types de parois opaques. Ceci nous permet de vérifier le bien-fondé des choix fait auparavant et surtout de valider un choix optimal de système de construction pour le bâtiment.

Il s'agit de trouver un optimum suivant les matériaux et différentes épaisseurs d'isolant et de pouvoir statuer sur la question s'il est plus avantageux d'augmenter l'isolant ou de travailler sur les vitrages.

### 3.5 Paramètres communs à tous les modèles

General		
Surface Habitable	149,19	m <sup>2</sup>
soit par appartement	74.59	m <sup>2</sup>
Volume	466,2	m <sup>3</sup>
Occupation et Critères de Confort		
Nombre d'Occupants	6	Personnes
Soit par Appartement	3	Personnes
Densité d'Occupation	0.042	pers./m <sup>2</sup>
Temps d'Occupation*	12	h/Jour
Activité Métabolique	1.26	met
Coeff. D'Habillement Hiver**	1.2	clo
Coeff. D'Habillement Été	0.8	clo
Consigne de Chauffage	20	°C
Consigne de Rafraîchissement	26	°C
Gains de Chaleur Divers***	2.1	W/m <sup>2</sup>
Humidité	Non contrôlée	%
Ventilation		
Minimum Air Neuf	30	m <sup>3</sup> /h. Pers.
Minimum Air Neuf Total	180	m <sup>3</sup> /h
Air Neuf par Volume	0.38	Vol./Heure
soit	0.334	l/s.m <sup>2</sup>
Taux Infiltration Enveloppe	0.35	Vol./Heure
Mode Free Cooling :		Oui
Pertes réseau (moyenne)	100	Pa
Efficacité Moteur	90	%
Chauffage et Rafraîchissement		
Type :	Unitaire, Multizone	
Mode d'Opération	24/24, 7/7	
Récupération de Chaleur	Oui	
Récupération de chaleur Sensible :	80	%
Récupération de chaleur Latente :	85	%
Énergie Primaire :	Électricité	
Pompe à Chaleur Air/Air :	Convection (PAC air/air)	
COP Chauffage :	3.5	
Température de l'Air Chaud	35	°C
Cop Rafraîchissement	2.5	
Température de l'Air Rafraîchie	12	°C

Tableau 16: Résumé des paramètres communs à tous les calculs.

### 3.6 Paramètres du modèle de Base

Nos premiers calculs s'effectuent sur le modèle qui nous servira de référence pour l'ensemble de notre étude. Nous allons faire une présentation détaillée du premier cas, ce qui nous permettra de justifier nos axes d'optimisation choisis. Le Tableau 17 nous donne les coefficients adoptés pour le modèle de référence dit de « base ».

Paramètres du Modèle de Base	
Objet Murs	Valeur et Détail $U = 0.15 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ Système de construction avec poutrelles ajourées en « I ». Isolant à base de fibre de bois de 25 cm, inertie lourde de l'enveloppe.
Plancher sur Terre- Plein	$U = 0.15 \text{ (W/m}^2\text{K)}$
Toiture	$U = 0.15 \text{ (W/m}^2\text{K)}$
Fenêtres	Vitrage Base $U = 0.752 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ CGCS = 0.496 $g = 0.706$
Surface Vitrée Protections Solaires	20% Toutes Pièces Non

Tableau 17 : Coefficients U du modèle de de référence dit de "Base".

#### 3.6.1 Détail des résultats

- Confort d'hiver : calcul des besoins de chauffage

Dans un premier temps il ne s'agit pas d'un calcul dynamique mais un calcul de dimensionnement en régime permanent pour pouvoir déterminer la puissance nécessaire au chauffage des lieux en prenant une journée de référence en hiver.

Les résultats obtenus sont identiques pour les deux appartements (Gauche ou Droite). Nous avons besoin d'une puissance installée totale de 4,14 kW soit 2,07 kW par logement, ou une puissance de 2 000 Watts. Ceci est légèrement au-dessus de la puissance recommandée de 10 W/m<sup>2</sup> mais le facteur déterminant pour nous sera la consommation totale annuelle du système amenée à un ratio au mètre carré.

Nous constatons un très faible écart de températures entre les pièces (Tableau 18), mais nous sommes dans le cadre d'un calcul de dimensionnement des systèmes de chauffage en régime permanent et non d'un calcul dynamique.

Ceci peut nous amener à penser qu'il n'y a pas d'échanges entre les différentes zones pour justifier un zoning mais notre zoning, rappelons-le, est suivant l'orientation cardinale des pièces pour que nous puissions optimiser certains composants de l'enveloppe.

Zone	Température de confort (°C)	Pertes thermiques en régime permanent (kW)	Puissance de dimensionnement (kW)
Entrée	19.67	0.11	0.11
SdB	19.77	0.31	0.31
Chambre	19.65	0.73	0.73
Séjour-Cuisine	19.69	0.92	0.92

Tableau 18 : Températures constatées lors du calcul des besoins de chauffage.

- Les déperditions

Pour les besoins de notre étude, nous allons adopter la convention de signe suivante :

Toute déperdition sera notée avec un signe négatif, pour simplifier la comparaison sur les Figures.

Températures et Déperditions	
Température d'air (°C)	20
Température radiante (°C)	19.43
Température opérative (°C)	19.72
Température sèche air extérieur (°C)	-3.1
Vitrage (kW)	-0.56
Murs (kW)	-0.56
Planchers sur terre-plein (kW)	-0.13
Toits (kW)	-0.06
Infiltration extérieure (kW)	-1.36
Vent. externe (kW)	-1.49
Total déperditions (kW)	- 4.16

Tableau 19 : Conditions de dimensionnement et déperditions globales de l'enveloppe.

Dans le Tableau 19, nous pouvons remarquer l'importance des déperditions dues à l'infiltration et l'effet du vent qui comptent pour plus de 70% du total. Nous pouvons insister, et ce même avant de continuer notre étude, sur l'importance de l'étanchéité à l'air de l'ensemble du bâti. Il faut noter que nous avons les mêmes pertes aussi bien à travers le vitrage qu'au travers des murs de 0,56kW chacun.

### 3.6.2 Confort d'été : analyse des échanges thermique à travers l'enveloppe.

Comme pour le dimensionnement du chauffage nous ne cherchons pas, dans un premier temps, à déterminer le comportement global de notre bâtiment sur une année mais seulement sur une journée typique d'été.

- Apports Solaires par les Fenêtres

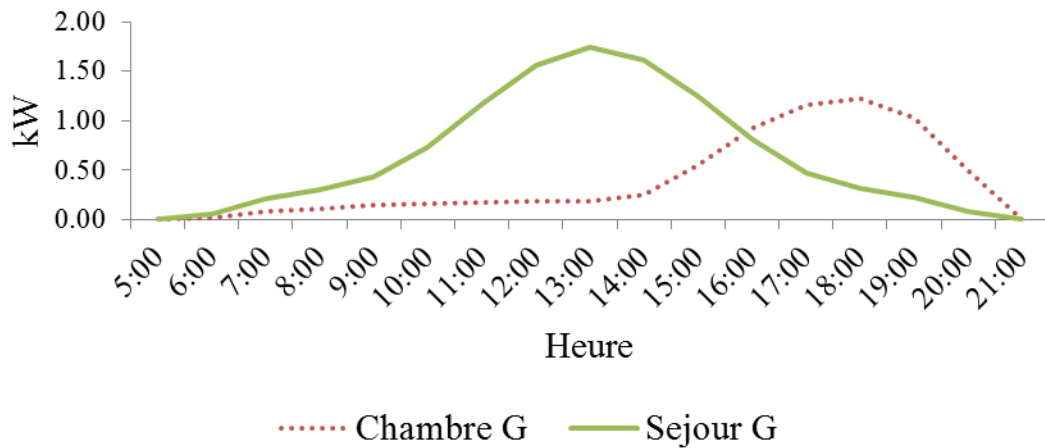


Figure 46 : Apports solaires (kW) à travers les fenêtres côté gauche de la maison.

La Figure

Figure 46 44 et la Figure 47 nous montrent les gains solaires à travers les vitrages suivant les pièces. L'orientation simple du bâtiment place les chambres à l'Est et l'Ouest et les pièces principales de vie au Sud. Ils sont donnés pour la même journée d'été de référence, le 15 juillet, de 5h du matin à 21 h.

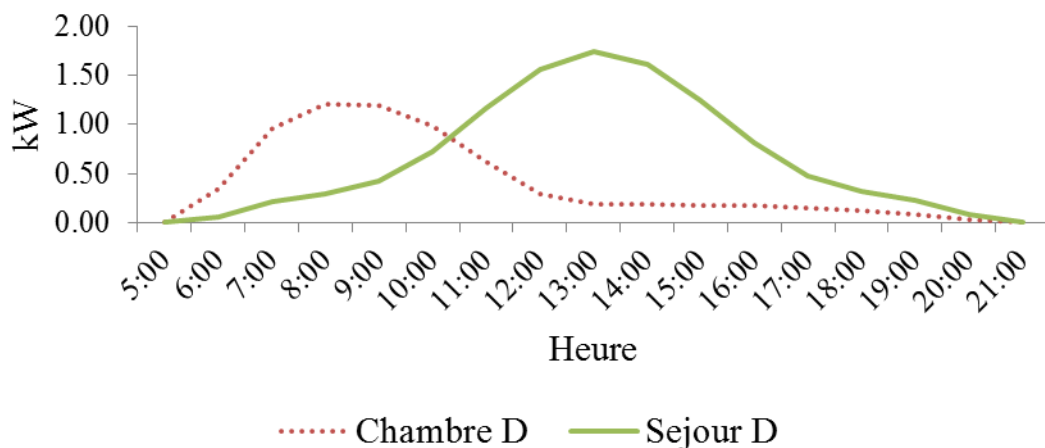


Figure 47 : Apports solaires (kW) à travers les fenêtres côté droit de la maison.

Nous devons veiller à trouver une protection pour le rayonnement solaire matinal et en fin de journée pour les chambres (1,2 kWh de gains en moyenne), mais nous devrions surtout



protéger la façade Sud (1,4 kWh). Cela peut sembler évident mais il est primordial de maîtriser le rayonnement solaire bien avant que ce dernier n'atteigne les vitrages.

Nous pouvons faire un premier constat sur les apports solaires à travers les vitrages, nous avons un pic des apports côté Est de 1,21 kWh à 8 heures du matin et côté Ouest de 1.23 kWh à 18 heures. Sur la façade Sud nous avons un pic de 1,74 kWh pour les deux séjours et ce à 13 heures.

- Le flux thermique à travers les parois opaques

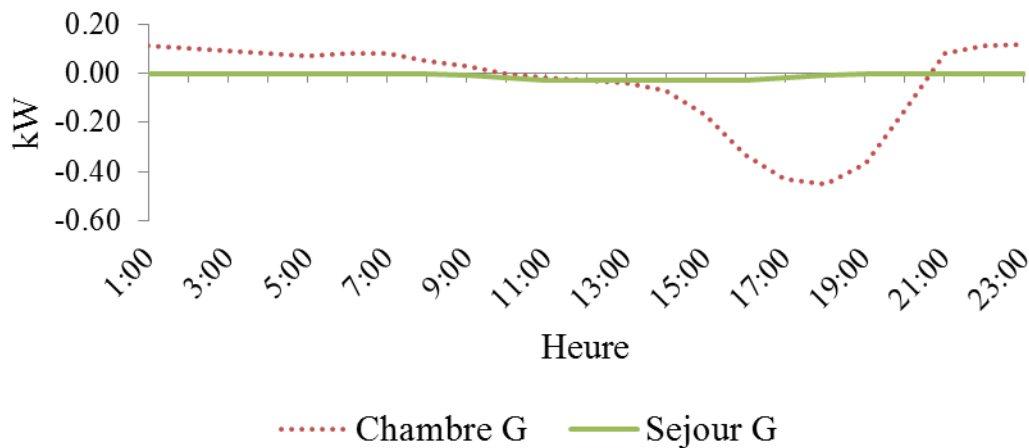


Figure 48: Déperditions à travers les murs en kW, côté Gauche (exposition Est et Sud).

Nous savons, même avant de faire un calcul détaillé, que pendant les périodes estivales les fenêtres transmettent l'énergie solaire directement vers l'intérieur d'un local donné et ceci aura une influence sur le confort thermique, mais nous ne pouvons pas encore déterminer précisément les actions à prendre sans une analyse plus détaillée.

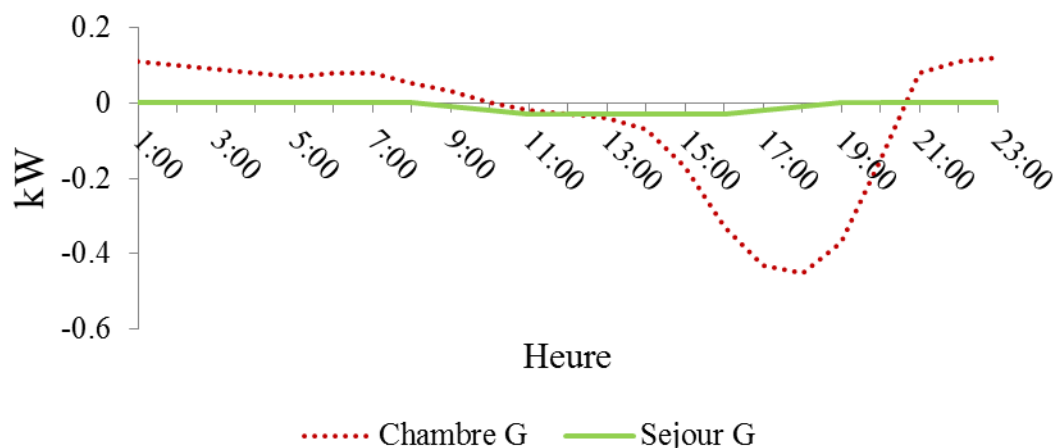


Figure 49: Déperditions à travers les murs en kW, côté droit (exposition Sud et Ouest).

La Figure 48 et la Figure 49 nous montrent l'ensemble des déperditions calorifiques pièce par pièce. Il est intéressant de constater que les plus grandes déperditions proviennent des pièces les plus exposées sur les pignons de la maison, c'est-à-dire l'ensemble composé par les chambres gauches et droites situées à l'Est et l'Ouest.

Les pics que nous pouvons constater pour la chambre droite entre 8 et 10 heures du matin (maximale de 0,43 kW) et pour la chambre gauche (maximum 0,45 kW) entre 16 et 18 heures correspondent aux apports solaires directs sur la paroi, ceci pourra entrainer un accroissement de la température intérieure et donc être source d'inconfort. Ces gains vont s'ajouter aux apports solaires directs et nous devons absolument traiter ceux-ci si nous voulons garantir des conditions de confort optimales.

- Déperditions par le sol

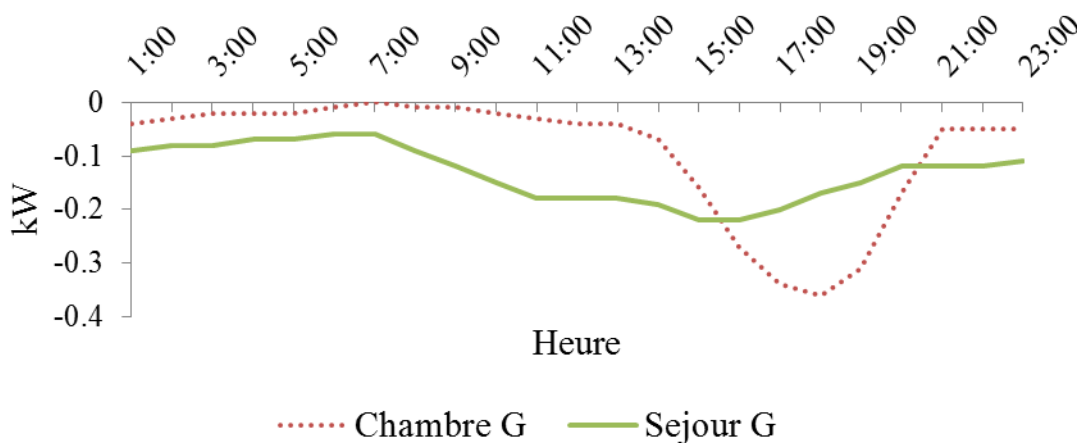


Figure 50: Déperditions par plancher sur terre-plein (kW), côté gauche de la maison.

Nous pouvons faire deux constats importants sur les Figure 50 et 51. En premier lieu, nous pouvons constater le même profil de déperditions pour les chambres, c'est-à-dire que nous avons un pic dans la matinée pour la chambre droite (0,32 kWh) et l'autre pic dans l'après-midi pour la chambre gauche (0,36 kWh) suivant la course du soleil

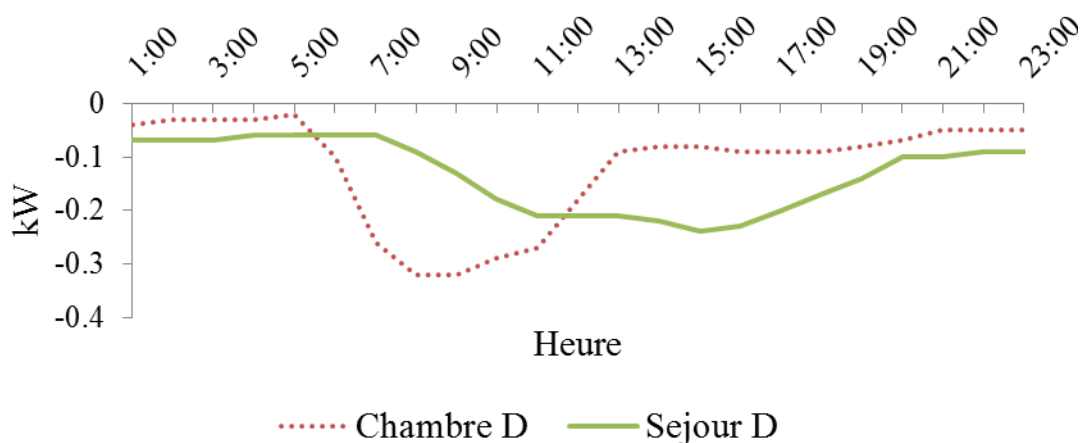


Figure 51: Déperditions par plancher sur terre-plein (kW), côté Droit de la maison.

De même pour les pièces de vie principales situées le long de la façade Sud, les échanges avec le sol sont croissants jusqu'à 11 heures du matin (approximativement 0,21 kWh), pour ensuite palier et décroître vers 16 – 18 heures.

### 3.6.3 Comparatif de l'ensemble des pertes /déperditions des chambres

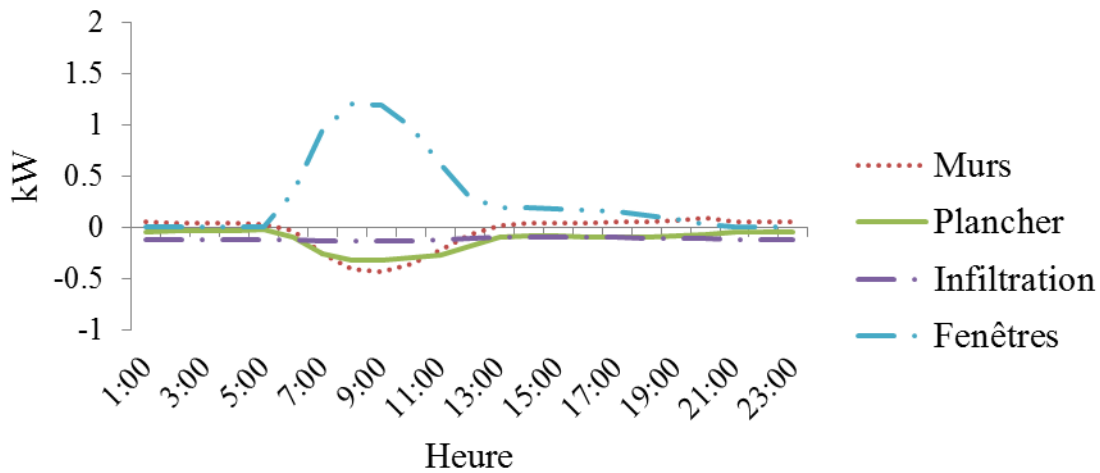


Figure 52: Apports et déperditions dans la chambre droite, située à l'Est, journée du 15 Juillet.

Dans la chambre droite, nous pouvons voyons clairement un pic des apports solaires des fenêtres extérieures (rayonnement direct et flux indirect) qui correspond au rayonnement solaire reçu sur la façade Est au matin. Des gains à travers le vitrage sont constatés et en même temps nous avons des déperditions par les murs, le plancher sur terre-plein et l'infiltration.

Ceci correspond à un gain net en chaleur. Ces gains sont souhaitables en hiver mais sont source d'inconfort en mi saison et en été. Il est également intéressant de constater que les murs sont aussi une source de transmission de chaleur vers l'intérieur. Nous chercherons, par la suite, à diminuer ces derniers au maximum tout en tenant compte des objectifs de confort et d'économies d'énergie pour les besoins en chauffage.

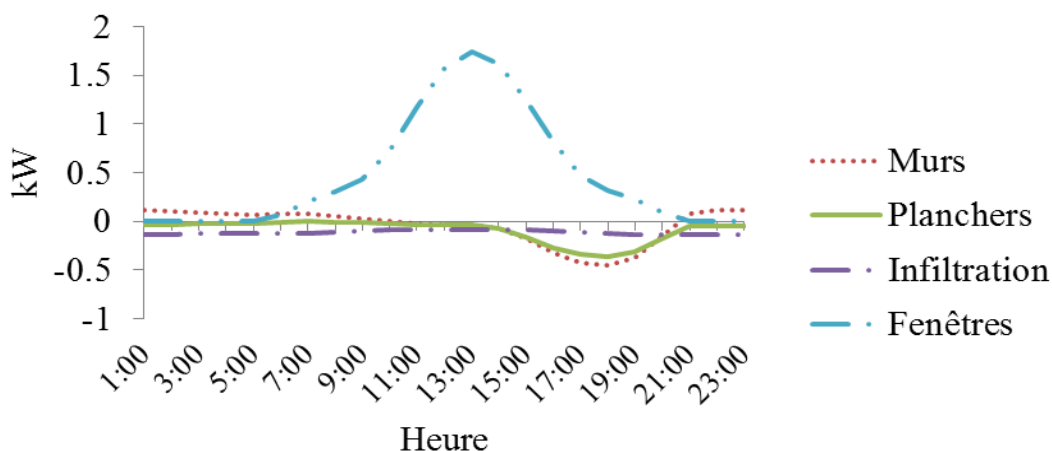


Figure 53 : Apports et déperditions dans la chambre droite, situe à l'Ouest, journée du 15 Juillet.

Pour la chambre gauche qui ne reçoit que le rayonnement direct du soleil dans l'après-midi, la courbe des apports solaires par les fenêtres est décalée comme nous tenons compte du rayonnement direct et indirect. Il faut également remarquer que les gains sont plus importants sur cette façade par rapport à la façade orientée côté Est du bâtiment. Nous avons un pic d'apports correspondant à 1,74 kWh à 13 heures pour le Chambres Gauches qui contraste avec 1,21 kWh seulement à 8 heures du matin pour les chambres droites.

### 3.6.4 Premiers résultats et premiers constats

A priori, ces résultats suffisent pour satisfaire les critères du label Maison Passive (Tableau 20) avec une consommation annuelle du système de chauffage complet (pompes, ventilateurs et chauffage d'appoint) de 14,34 kWh/m<sup>2</sup> annuels. Nous constatons l'efficacité de l'échangeur qui compte pour plus de 50% de la charge de chauffage.

Nous avons toutefois une consommation de froid, qui en soi n'est pas gênante car nous avons une pompe à chaleur réversible. Mais il nous semble plus pertinent de regarder l'index de confort sur l'ensemble de l'année avant de pouvoir conclure sur le modèle de base.

Sur la Figure 54, nous pouvons constater une bonne homogénéité du confort en période d'hiver, la courbe est proche du 0, c'est-à-dire que nous avons quasiment 100 % de satisfaits selon les critères de Fanger.

Résultats de modèle de Base	
Poste	Base
Total Consommation CVR	14.34 kWh/m <sup>2</sup>
% Temps > 25°C	24.38%
Puissance Chauffage	4.14 kW
Consommation Chauffage	1782.66 kWh
Consommation Rafraichissement	41.87 kWh
Ventilateurs	315.16 kWh
Récupération de Chaleur : Rafraichissement	4.68 kWh
Récupération de Chaleur : Chauffage	1790.01 kWh

Tableau 20 : Résultats annuels pour le modèle de Base.

En mi saison, nous pouvons constater un pic d'inconfort vers le bas, au-delà de  $-0,5\%$ , c'est-à-dire une sensation de froid en Avril (15 et du 25 au 29). Ce pic d'inconfort peut s'expliquer de plusieurs manières mais nous allons supposer, dans un premier temps, que ceci est dû au fait que le taux d'humidité n'est pas contrôlé. Il ne faut pas oublier que le climat Normand est humide en Hiver/mi- saison et peut être source d'inconfort.

Par contre, nous avons des surchauffes en continu durant la période estivale (du 10 Juin au 1 septembre) et nous dépassons quasiment en continu le taux de  $+0,5$ , c'est-à-dire 10% de satisfaits. Nous constatons même des pics de surchauffe vers la fin du mois, de Septembre et au mois d'Octobre, ce qui n'est pas souhaitable

Nous avons donc des surchauffes périodiques qui sont source d'inconfort aux occupants. Malgré le fait que nous remplissons les critères de consommation énergétique pour une maison passive (le résumé des consommations est donné dans le Tableau 20 ), nous ne pouvons garantir le confort d'été, nous atteignons 24,38% du temps  $> 25^{\circ}\text{C}$ , et nous devons donc trouver une solution.

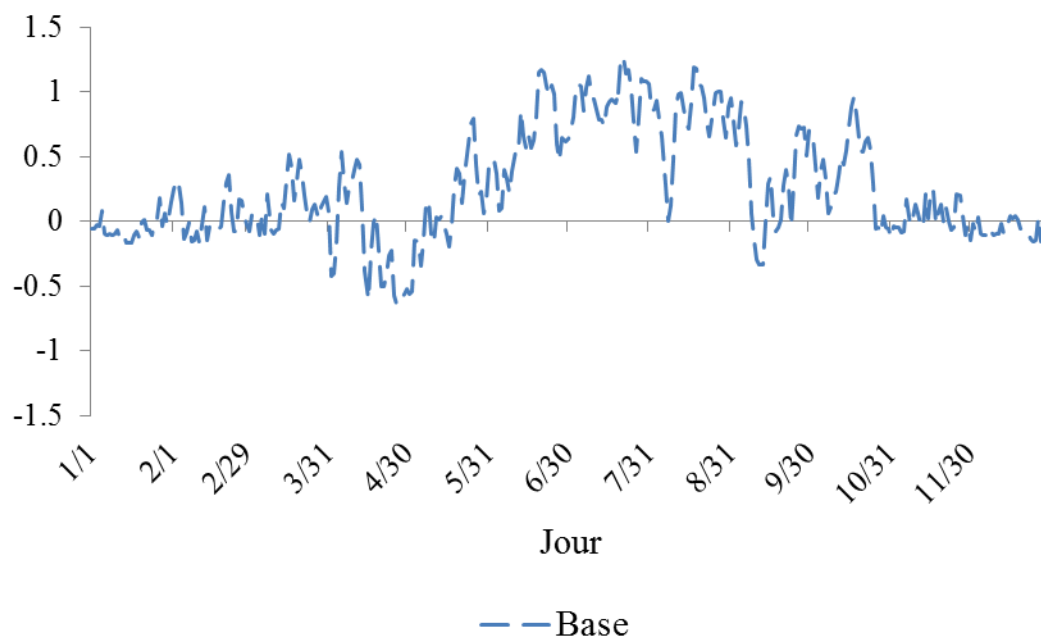


Figure 54 : Modèle Fanger sur une année complète, modèle de base.

### 3.6.5 Proposition d'une solution « active »

De manière « passive » nous pouvons agir sur les flux de chaleur traversant l'enveloppe, maîtriser la quantité de rayonnement solaire qui traverse les vitrages et limiter les déperditions et ceci par un choix raisonné des matériaux et produits mis en œuvre.

La notion de confort selon Fanger est composée de paramètres dont leur interaction agit sur l'indice de satisfaction. Nous avons un paramètre sur lequel nous ne pouvons, en agissant seulement sur les isolants et vitrages, agir dessus de manière « passive », c'est le taux d'humidité. Nous pouvons le contrôler de manière mécanique avec la pompe à chaleur, en rafraîchissant l'air entrant pour provoquer une condensation.

Le taux optimal d'humidité relative pour le métabolisme humain est entre 30% et 70% (suivant les saisons), nous allons donc modéliser le contrôle actif du taux d'humidité dans le logiciel, les résultats sur la courbe de Fanger sont donnés sur la Figure 55.

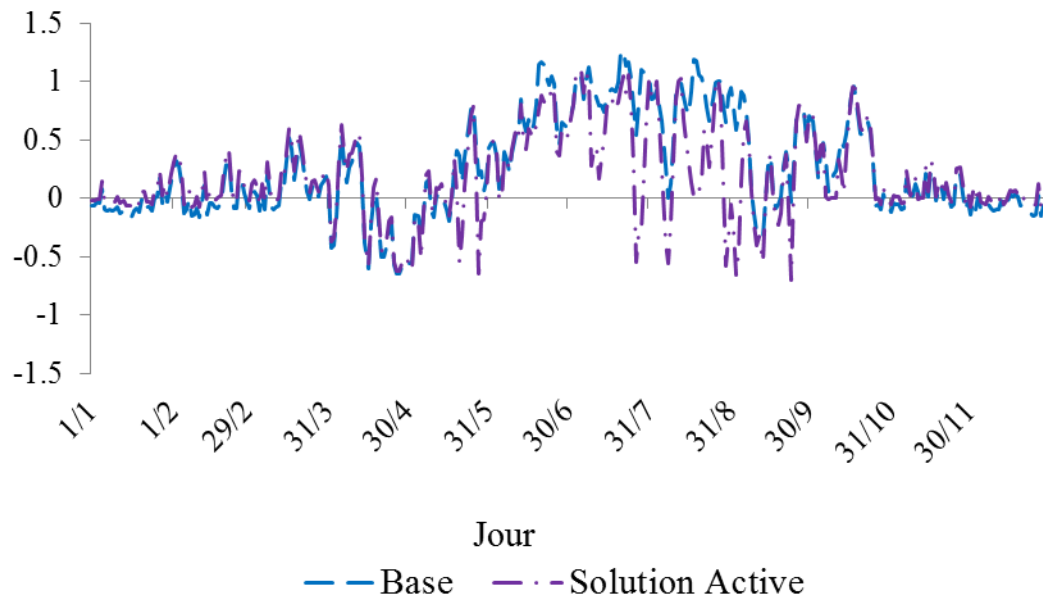


Figure 55 : Modèle de Fanger base et active.

Comparatif des Résultats Base – Solution « active »		
Poste	Base	Solution Active
Total Consommation CVR	14.34 kWh/m <sup>2</sup>	18.36 kWh/m <sup>2</sup>
% Temps > 25°C	24.38 %	13.70%
Puissance Chauffage	4.14 kW	4.14 kW
Consommation Chauffage	1782.66 kWh	1941.90 kWh
Consommation Rafraîchissement	41.87 kWh	482.58 kWh
Ventilateurs	315.16 kWh	315.16 kWh
Récupération de Chaleur : Rafraîchissement	4.68 kWh	44.66 kWh
Récupération de Chaleur : Chauffage	1790.01 kWh	2006.19 kWh

Tableau 21 : Comparaison des résultats des deux modèles, Base et Actif.

Nous pouvons constater une différence entre le modèle « passif » et le modèle « actif », mais les gains escomptés ne sont pas tout à fait convaincants.

En été avec le modèle actif nous avons toujours des pics d'inconfort, et de plus ces pics nous indiquent que les occupants ressentent soit une sensation de froid, soit une sensation de chaud et ce pour la même époque de l'année, nous avons une instabilité. La juxtaposition des deux courbes de Fanger sur la Figure 55 nous montre que nous n'avons pas une solution convaincante, car nous n'atteignons pas les critères de confort demandés par le label.

En regardant de plus près sur les résultats donnés en Tableau 21, nous nous apercevons que la solution dite « active » n'en est pas une solution valable et ce pour les raisons suivantes :

- Nous avons une consommation totale des systèmes de CVR en kWh/m<sup>2</sup> en hausse de plus de 28%
- Parmi les consommations en hausse nous pouvons constater une hausse des besoins en rafraîchissement de plus de 1 000% (contrôle d'humidité). Le critère de confort pour les maisons passives n'est toujours pas respecté avec 13,70% du temps une température > 25°C.

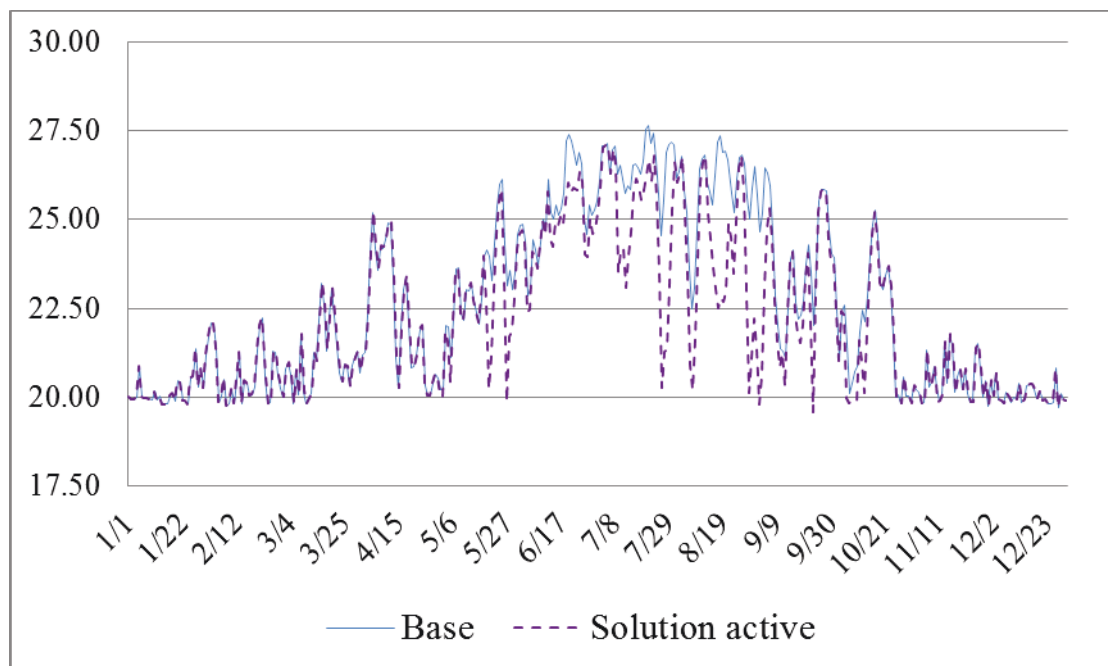


Figure 56 : Températures Opératives modèle de Base et modèle dit Actif.

Sur la Figure 56 nous pouvons constater les différences entre les deux modèles sur la température opérative. Nous nous apercevons clairement de l'influence de la déshumidification sur ce dernier, les pics de périodes « chaudes » sont moindres mais nous pouvons toujours constater que cette solution seule ne suffit pas à satisfaire aux termes de confort, nous sommes largement au-dessus du seuil de 10% temps > 25°C.

Nous ne sommes plus dans une optique de maison passive au regard des consommations annuelles et le fait d'avoir une hausse inacceptable des besoins en froid nous permet de conclure que les solutions « actives » pour les besoins de confort ne peuvent être une réponse durable aux problématiques qui sont posées aujourd'hui, c'est-à-dire une réduction des gaz à effet de serre tout en apportant un confort optimal pour les occupants.





## Chapitre 4

### Optimisation de l'enveloppe

#### 4.1 Optimisation des parois vitrées

##### 4.1.1 Pourcentage de façade vitrée et typologie des vitres modélisées

Nous allons aborder la problématique du pourcentage vitré des façades, il s'agit de pouvoir trouver un compromis entre des paramètres qui rentrent souvent en conflit.

Type	Modification Dans Les Intercalaires	Transmission Solaire SHGC	g	U W/m <sup>2</sup> K
Base	Remplissage Air 16 mm	0.496	0.706	0.752
Type 1a	Remplissage Krypton 12 mm	0.515	0,706	0,461
Type 1b	Remplissage Argon 12 mm	0,522	0,719	0,703
Type 1c	Remplissage Air 12 mm	0,522	0,719	0,944
Type 2a	Remplissage Krypton 12 mm	0.497	0,706	0,455
Type 2b	Remplissage Argon 12 mm	0,496	0,706	0,697
Type 2c	Remplissage Air 12 mm	0,496	0,706	0,938
Type 3a	Remplissage Krypton 12 mm	0.301	0,535	0,463
Type 3b	Remplissage Argon 12 mm	0,300	0,535	0,705
Type 3c	Remplissage Air 12 mm	0,303	0,535	0,947

Tableau 22 : Typologie des différents vitrages étudiés.

Par exemple une fenêtre est source de lumière, apporte un confort visuel et peut être source de chaleur ; mais une fenêtre peut être aussi une source d'inconfort (sensation de paroi froide ou chaude) mais est surtout une des principales sources de déperditions de l'enveloppe du bâtiment (Tableau 19).

Pour déterminer un ratio optimal de pourcentage vitré, nous devons étudier les paramètres suivants :

- Apports Solaires Absorbés par les fenêtres.
- Le Charge de Chauffage.
- La Degrée de Confort.

La simulation dynamique nous permet d'étudier les paramètres cités précédemment suivant les différents types de vitres que nous avons définis précédemment. Les différentes typologies de vitrages étudiées dans le Tableau 22.

#### 4.1.2 Les apports solaires absorbés

Nous avons défini quatre types de fenêtres, chacune avec des propriétés optiques bien distinctes. Il est intéressant d'étudier les apports que chaque type de fenêtre peut apporter à l'ensemble de l'édifice. Ceci nous permettra une meilleure compréhension du comportement global de l'enveloppe.

Apports Solaires Absorbés (W/m <sup>2</sup> )					
	Base	Type 1a	Type 1b	Type 1c	Type 2a
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20%	5,635.96	6,001.72	6,395.81	6,395.81	5,635.96
40%	11,729.07	12,490.82	13,312.44	13,312.44	11,729.07
60%	18,203.77	19,386.64	20,663.34	20,663.34	18,203.77
80%	22,443.99	23,902.71	25,477.58	25,477.58	22,443.99
100%	22,443.99	23,902.71	25,477.58	25,477.58	22,443.99
Apports Solaires Absorbés (W/m <sup>2</sup> ) - suite					
	Type 2b	Type 2c	Type 3a	Type 3b	Type 3c
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20%	5,635.96	5,635.96	3,440.98	3,440.98	3,440.98
40%	11,729.07	11,729.07	7,161.31	7,161.31	7,161.31
60%	18,203.77	18,203.77	11,114.79	11,114.79	11,114.79
80%	22,443.99	22,443.99	13,703.92	13,703.92	13,703.92
100%	22,443.99	22,443.99	13,703.92	13,703.92	13,703.92

Tableau 23 : Quantité d'apports solaires.

Le Tableau 23 résume les apports de chaque type de fenêtre suivant le pourcentage d'ouverture dans la façade.

Il est intéressant de signaler que la quantité d'apports solaires par type de vitre dépend essentiellement des propriétés optiques de ces derniers et que le gaz de remplissage joue un rôle moindre. Ceci nous confirme le fait que le gaz de remplissage joue seulement un rôle sur la transmission thermique de l'ensemble.

La Figure 57 illustre bien nos propos et nous pouvons clairement voir que les vitres de même type ont exactement le même comportement et absorbent la même quantité d'énergie indépendamment du type de gaz de remplissage.

Nous pouvons faire une remarque importante : effectivement nous pouvons constater une réelle différence entre les vitres composées de films basse émissivité et le vitrage composés d'un film suspendu.

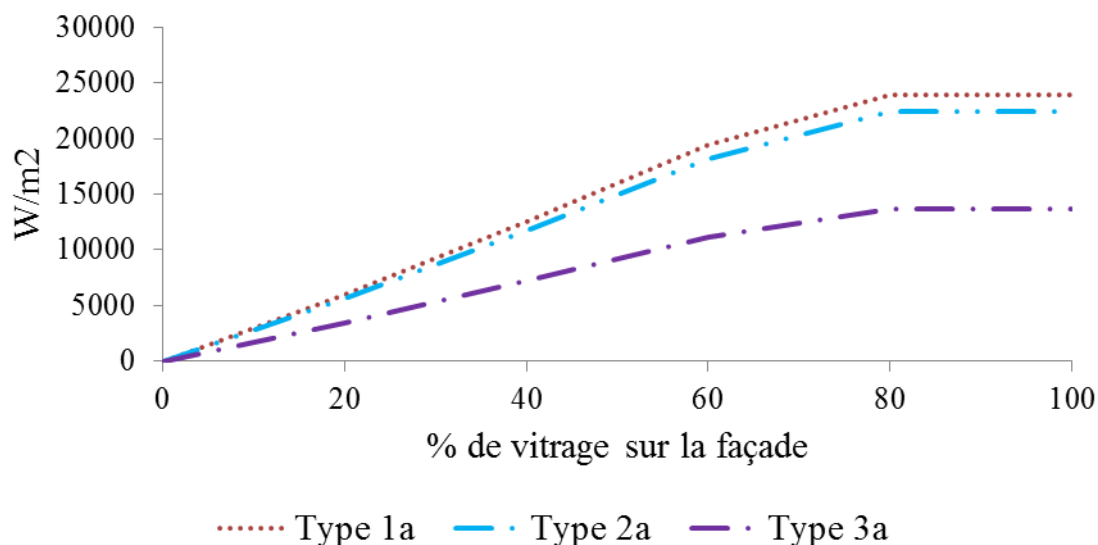


Figure 57 : Apports Solaires absorbés (W/m<sup>2</sup>) suivant le type de vitre et le pourcentage de façade vitrée.

Les couches basses émissivité laissent passer plus d'énergie, par exemple pour une façade vitrée à 80%, le Type 1a transmet une totalité de 23 903 W/m<sup>2</sup> par rapport au Type 3a qui ne transmet que 13 703 W/m<sup>2</sup>, une différence de 42%, une différence relativement importante. Les conséquences sont doubles, nous pouvons minimiser les besoins de chauffage en optimisant les apports gratuits mais nous pouvons aussi craindre des surchauffes dues à ces mêmes apports.

Dans un deuxième temps, nous remarquons que nous ne pouvons pas distinguer une différence entre les apports pour une façade vitrée à 80% ou une façade vitrée à 100%. La Figure 57 nous montre clairement ce palier, le maximal se trouvant donc à 80%. Nous allons maintenant aborder la charge de chauffage et étudier en détail les impacts suivant le type de vitres et le pourcentage de façade vitrée.

### 4.1.3 Besoins en chauffage

Les charges de chauffage suivant le pourcentage de façade vitrée et le type de vitre sont données dans le Tableau 24. Nous pouvons aussi constater que les vitres avec un remplissage de gaz rares (Krypton Type 1a, 2a .... et Argon Type 1b, 2b ...) nécessitent une puissance de chauffe moindre que par rapport à un remplissage uniquement à l'air. La différence est au prorata plus grande suivant le pourcentage de vitrage et nous retrouvons le même palier à partir d'une façade vitrée à 80%, la charge de chauffage n'augmente plus.

Fait d'autant plus intéressant pour nous est le passage d'une façade vitrée de 20% à 40%, la charge de chauffage diminue, de nouveau, avec un remplissage au gaz rare et les vitres avec un remplissage à l'air voient la charge de chauffage augmenter.

Charge de Chauffage (kWh)					
	Base	Type 1a	Type 1b	Type 1c	Type 2a
0%	521.16	521.16	521.16	521.16	521.16
20%	1005.3	713.9	912.28	1137.52	730.88
40%	1029.36	547.05	884.75	1295.86	559.87
60%	1357.46	593.88	1140.92	1851.51	600.06
80%	1757.34	720.58	1480.35	2453.01	717.25
100%	1757.34	720.58	1480.35	2453.01	717.25

Charge de Chauffage (kWh) - suite					
	Type 2b	Type 2c	Type 3a	Type 3b	Type 3c
0%	521.16	521.16	521.16	521.16	521.16
20%	941.67	1169.86	1035.2	1271.18	1511.67
40%	915.15	1333.94	941.69	1378.42	1861.24
60%	1163.85	1879.64	954.69	1606.57	2383.86
80%	1493.74	2473.17	1033.78	1869.26	2887.34
100%	1493.74	2473.17	1033.78	1869.26	2887.34

Tableau 24 : Charge de chauffe suivant le type de vitrage et la façade recouverte.

Cette diminution pour les vitrages avec un gaz rare est principalement due à l'isolation thermique renforcée par la présence de ce dernier confirmant ce que l'on avait pu constater auparavant

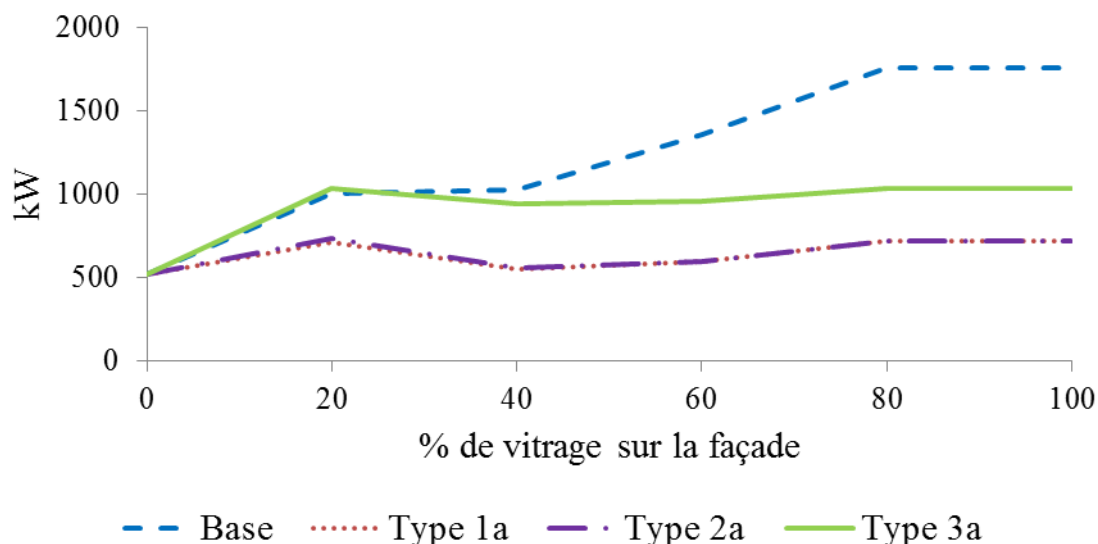


Figure 58: Charge de chauffage (kW) suivant le type de vitrage et le pourcentage de façade vitrée.

Les vitres avec un film basse émissivité (Type 1 et Type 2) requièrent une charge de chauffage moindre que par rapport au Type #et ce indépendamment du gaz de remplissage.

Nous pouvons voir l'avantage d'un remplissage Krypton car même pour une façade vitrée à 60%, la charge de chauffage reste inférieure à celle correspondante pour une façade vitrée à 20% et ceci est valable pour tout type de fenêtre. Il nous semble avoir un optimum de façade vitrée entre 20 et 60%.

Sur la Figure 58 nous constatons que la charge de chauffage est moindre pour des fenêtres avec couche basse émissivité (Type 1 et 2) et ce pour toute surface vitrée confondue. Ceci est dû au fait que ces fenêtres laissent une plus grande partie d'apports gratuits passer au travers de la fenêtre. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ceci est souhaitable en hiver et mi-saison mais moins lors des périodes estivales. Mais nous ne pouvons apporter de conclusions sans étudier le confort et l'impact de la surface vitrée, et du type de vitrage sur ce dernier.

#### 4.1.4 Étude du confort

Les résultats pour le facteur de confort Fanger sur une échelle de -3 à +3 sont résumés dans le Tableau 25 et sur la Figure 60. Nous allons commenter par groupes de vitres car de nouveau nous pouvons constater une différence entre les fenêtres avec une couche basse émissivités (Type 1 et 2) et celles avec un film suspendu (Type 3).

Fanger PMV					
	Base	Type 1a	Type 1b	Type 1c	Type 2a
0%	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11
20%	0.24	0.34	0.28	0.23	0.31
40%	0.5	0.61	0.54	0.47	0.6
60%	0.57	0.7	0.61	0.52	0.69
80%	0.58	0.73	0.62	0.53	0.72
100%	0.58	0.73	0.62	0.53	0.72
Fanger PMV - suite					
	Type 2b	Type 2c	Type 3a	Type 3b	Type 3c
0%	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11
20%	0.25	0.2	-0.02	-0.07	-0.11
40%	0.52	0.45	0.35	0.26	0.17
60%	0.59	0.51	0.49	0.38	0.29
80%	0.61	0.52	0.53	0.41	0.31
100%	0.61	0.52	0.53	0.41	0.31

Tableau 25 : Valeurs pour Fanger suivant le type de vitrage et la surface de la façade couverte.

La zone de confort acceptable pour une maison passive se situe entre 0 et 0.5 sur une échelle de -3 à +3 selon le critère de Fanger, ceci correspond à un taux d'insatisfaction de 10% maximum.

Pour les vitres à couche basse émissivité nous remarquons que le taux maximal de confort est atteint très rapidement et au-delà de 40% de la façade vitrée le critère n'est plus respecté. Ce qui est d'autant plus intéressant car pour une faible surface vitrée (approximativement de 10 à 30%) ces mêmes fenêtres offrent un degré de confort optimal par rapport aux fenêtres avec un film suspendu.

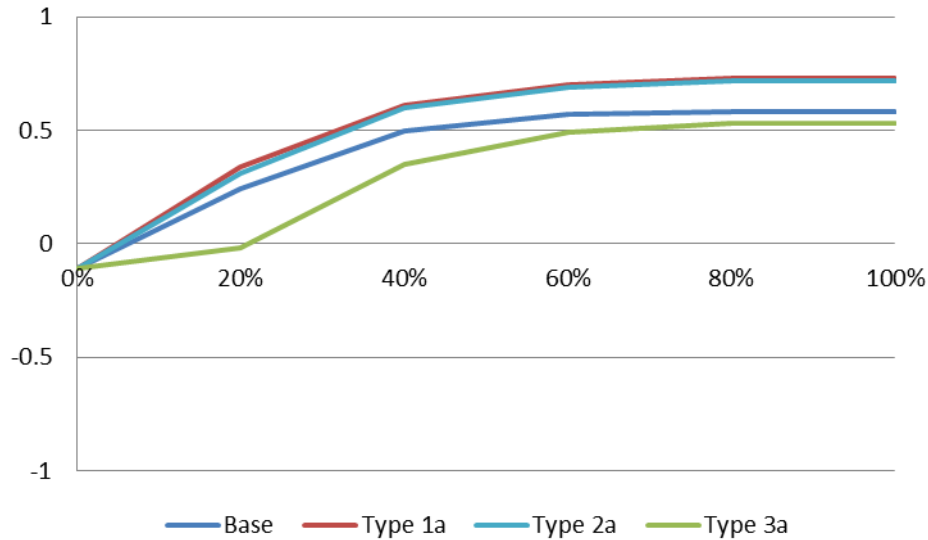


Figure 59 : Facteur de confort PMV suivant pourcentage de la façade vitrée.

Nous pouvons remarquer l'avantage de la vitre à film suspendu par rapport à des vitres « classiques » ayant une couche basse émissivité sur la Figure 59.

Par contre, les vitrages de Type 3 remplissent les critères de confort pour toutes les surfaces vitrées. Les avantages de ce type de vitrage sont pour une plus grande surface vitrée, les critères de confort sont maintenus même pour une surface 100%.

Nous pouvons aussi remarquer de nouveau rôle joué par le gaz de remplissage, notamment le krypton, bien qu'offrant une meilleure protection contre le flux thermique, il n'apporte pas un avantage sur les critères de confort, notamment pour les vitres de Type 3.

Pour terminer sur ces commentaires nous pouvons conclure que de nouveau ce sont les propriétés optiques et le gaz de remplissage qui influencent directement les critères de confort. Les échanges avec l'extérieur et donc la transmission à travers le vitrage jouent un rôle prépondérant pour le confort thermique.

### 4.1.5 Consommation totale d'énergie

La comparaison de la consommation totale d'énergie suivant le type de vitre et le pourcentage de façade vitrée nous confirme ce que nous avons pu constater auparavant :

Consommation Totale d'Énergie (kWh)					
	Base	Type 1a	Type 1b	Type 1c	Type 2a
0%	5739.15	5739.15	5739.15	5739.15	5739.15
20%	2915.25	2545.19	2800.39	3088.19	2557.02
40%	3427.71	2946.3	3327.73	3777.08	2905.46
60%	4705.1	4235.65	4668.03	5230.5	4115.29
80%	5844.17	5379.19	5837.76	6496.65	5207.67
100%	5844.17	5379.19	5837.76	6496.65	5207.67

Consommation Totale d'Énergie (kWh) - suite					
	Type 2b	Type 2c	Type 3a	Type 3b	Type 3c
0%	5739.15	5739.15	5739.15	5739.15	5739.15
20%	2832.36	3126.48	2955.46	3259.74	3570.51
40%	3298.24	3763.75	2886.29	3436.53	4038.66
60%	4548.21	5142.24	3235.67	3974.65	4834.34
80%	5663.24	6360.06	3639.14	4510.72	5538.82
100%	5663.24	6360.06	3639.14	4510.72	5538.82

Tableau 26 : Consommation d'énergie suivant le type de vitrage et la quantité sur façade.

Les vitres avec une couche basse émissivité ont une meilleure performance pour des plus petites surfaces vitrées. Pour un vitrage couvrant jusqu'à 20% de la façade, nous préférons donc ce type de vitre.

Pour les plus grandes surfaces vitrées, notre choix s'orientera vers les vitres ayant un film suspendu. Visiblement les propriétés optiques de ce type de vitrage sont plus intéressantes pour des plus grandes surfaces (Tableau 26).

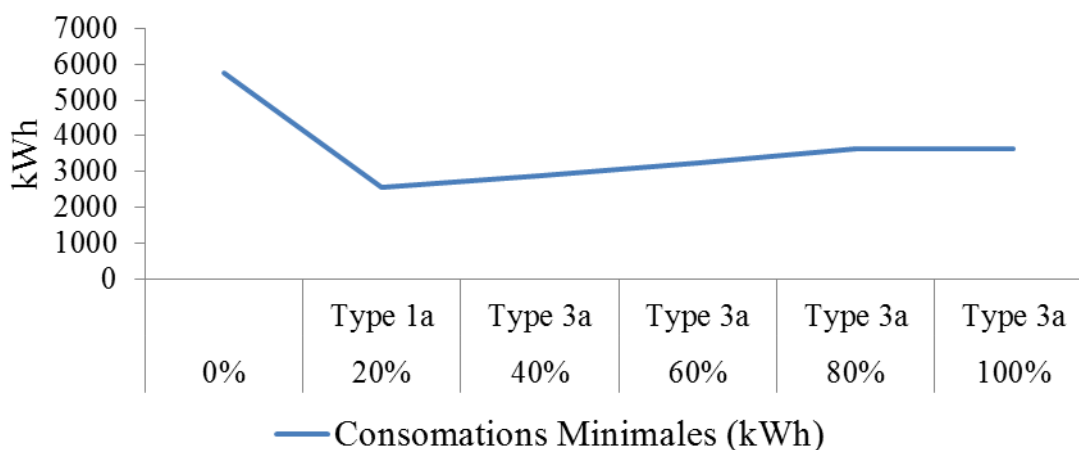


Figure 60 : Analyse des consommations minima suivant le type de vitre et la surface vitrée.

Les gaz rares ont un avantage certain sur les consommations énergétiques par rapport à un vitrage avec un remplissage à l'air (Figure 60).

Constat étonnant, sans fenêtres le bâtiment consommera plus d'énergie qu'en ayant une façade vitrée à 100% (Figure 60 et Figure 61). Ceci est dû à deux phénomènes distincts :

- Les apports à travers les fenêtres contribuent au bilan énergétique de manière positive en apportant une source de calories.
- Les fenêtres apportant aussi la lumière et la clarté, les besoins en éclairage artificiel sont moindres.

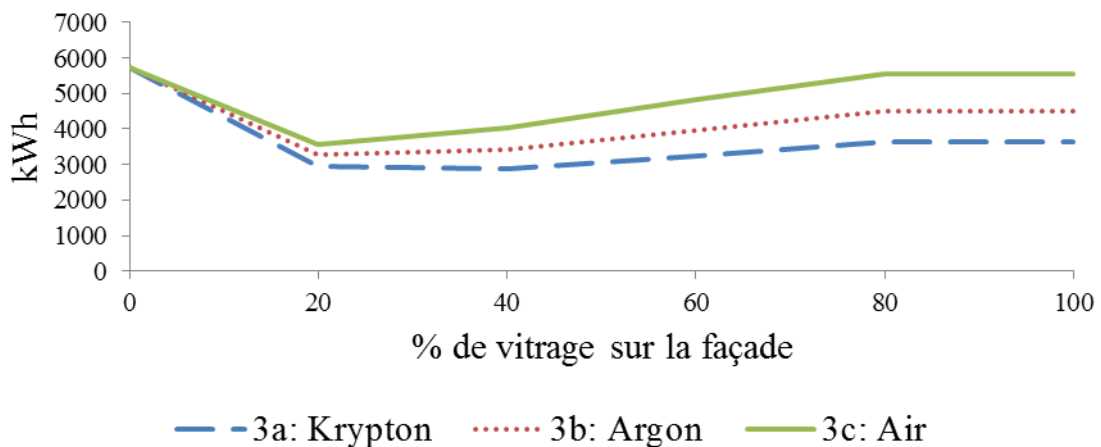


Figure 61 : Résultats pour le vitrage Type 3

Pour résumer cette partie d'analyse, sur l'optimisation des vitrages nous résumons les calculs dans le Tableau 27. Ceci nous permet un premier choix quant aux surfaces de fenêtres et types de vitrage :

- 10% de la surface vitrée pour la SdB, vitre Type 1a, la fenêtre est orientée plein Nord.
- 20% de la surface vitrée pour les Chambres, vitre Type 1a. Les fenêtres seront uniquement sur les pignons du bâtiment, orientées Est et Ouest.
- 60% de la surface vitrée pour le Séjour, vitre Type 3a. Les fenêtres sont orientées plein Sud.



Valeurs Optimales					
Apports Solaires Absorbés (W/m2)					
%	Vitre	Valeur	%	Vitre	Valeur
0			0		
20	Type 3	3,440.98	20	Type 2	5,635.96
40	Type 3	7,161.31	40	Type 2	11,729.07
60	Type 3	11,114.79	60	Type 2	18,203.77
80	Type 3	13,703.92	80	Type 2	2,443.99
100	Type 3	13,703.92	100	Type 2	22,443.99
Charge de Chauffage (kWh)					
%	Vitre	Valeur	%	Vitre	Valeur
0		521.16	0		
20	Type 1a	713.90	20	Type 2a	730.88
40	Type 1a	547.05	40	Type 2a	559.87
60	Type 1a	593.88	60	Type 2a	600.06
80	Type 2a	717.25	80	Type 1a	720.58
100	Type 2a	717.25	100	Type 1a	720.58
Fanger PMV					
%	Vitre	Valeur	%	Vitre	Valeur
0		-0.11	0		-0.11
20	Type 2c	0.20	20	Type 1c	0.23
40	Type 3c	0.17	40	Type 3b	0.26
60	Type 3c	0.29	60	Type 3b	0.38
80	Type 3c	0.31	80	Type 3b	0.31
100	Type 3c	0.31	100	Type 3b	0.31
Consommation Totale d'Énergie (kWh)					
%	Vitre	Valeur	%	Vitre	Valeur
0		5,739.15	0		5,739.15
20	Type 1a	2,545.19	20	Type 2a	2,557.02
40	Type 4a	2,886.19	40	Type 3a	2,886.29
60	Type 4a	3,235.25	60	Type 3a	3,235.67
80	Type 4a	3,639.02	80	Type 3a	3,639.14
100	Type 4a	3,639.02	100	Type 3a	3,639.14

Tableau 27 : Résumé des valeurs optimales suivant le pourcentage de la façade vitre

#### 4.1.6 Résultats et analyse

Nous pouvons constater une diminution de la consommation totale du poste de CVR, une diminution de la consommation annuelle de 1,64 kWh/m<sup>2</sup>, soit 11,43 % par rapport au modèle de base. Nous avons réduit les besoins en chauffage de 381,82 kWh, c'est-à-dire de 21,4%, ce qui n'est pas négligeable au vu des consommations déjà réduites du bâtiment.

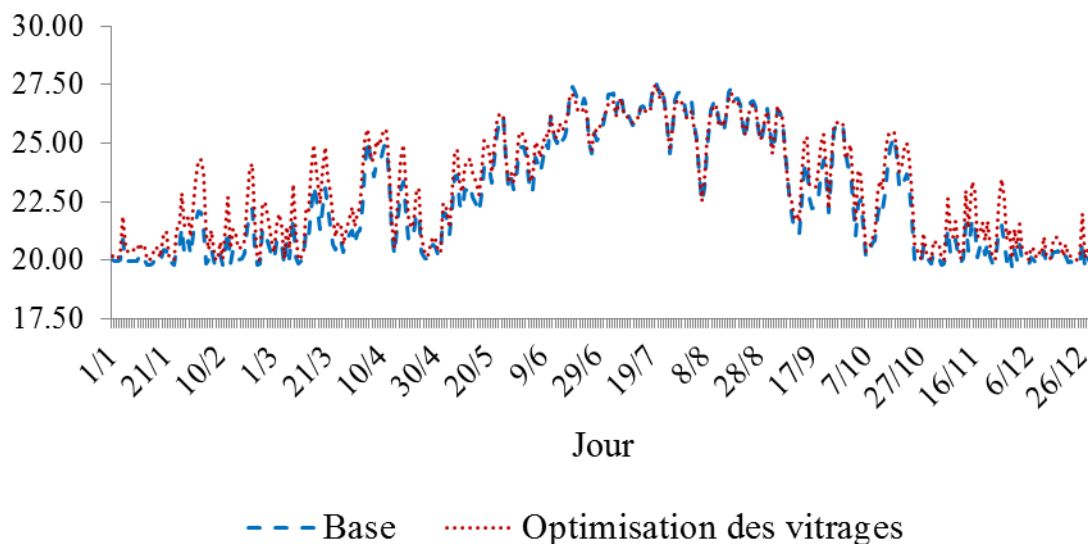


Figure 62 : Courbe de température opérative pour le modèle de base et le modèle avec les vitrages optimisés.

Nous allons comparer les deux courbes de température opératives sur une année, Figure 62. Nous constatons des pics de température en hiver et mi saison par rapport au modèle de base, et nous pouvons considérer que ces pics sont dus aux apports gratuits qui sont transmis à travers les vitrages et qui influencent directement la température opérative.

Mais nous pouvons constater en même temps une augmentation des besoins de rafraîchissement et ceci est principalement dû à l'effet de serre créé par le vitrage. Nous avons moins de pertes à travers le vitrage et l'excédent de calories doit être traité par les systèmes mécaniques, ce qui va à l'encontre d'un système dit « passif ».

En été, les courbes se suivent de près et nous ne pouvons donc pas faire de différence. Par contre nous avons une surconsommation des ventilateurs qui est due à l'effet de surchauffe que nous pouvons constater sur la courbe de Fanger, Figure 63

Résultats Après Optimisation des Vitrages		
Poste	Modèle de Base	Optimisation des Vitrages
Total Consommation CVR	14.34 kWh/m <sup>2</sup>	12.70 kWh/m <sup>2</sup>
%Temps > 25 °C	24.38 %	29.86 %
Puissance Chauffage	4.14 kW	4.02 kW
Consommation Chauffage	1782.66 kWh	1400.84 kWh
Consommation Rafraichissement	41.87 kWh	112.66 kWh
Ventilateurs	315.16 kWh	381.92 kWh
Récupération de Chaleur : Rafraichissement	4.68 kWh	6.43 kWh
Récupération de Chaleur : Chauffage	1790.01 kWh	1790.2 kWh

Tableau 28 : Résumé des résultats après étude des vitrages.

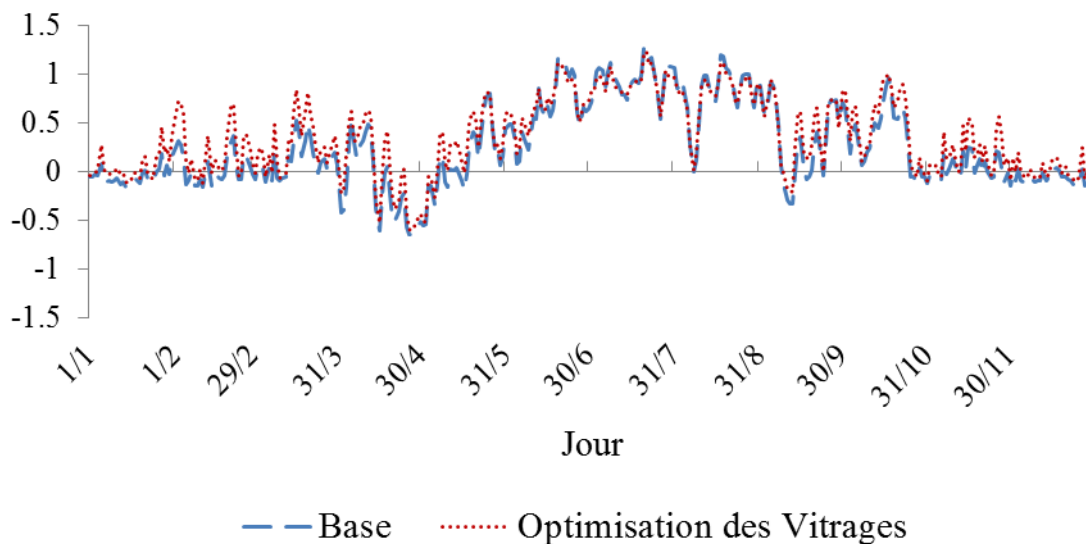


Figure 63 : Comparaison des courbes de confort pour le modèle de Base et le Modèle ayant les vitrages optimisés.

Bien que nous ayons largement réduit nos consommations par rapport au modèle de base, nous n'avons pas encore atteint des conditions de confort acceptables. Nous allons proposer d'étudier les protections solaires pour déterminer si cette solution suffira à remplir les critères de confort requis par le label Maison Passive.

## 4.2 Étude des masques solaires

Nous allons étudier les masques solaires, bien que cela puisse sembler paradoxal d'avoir des masques solaires pour un bâtiment en Normandie mais nous devons respecter les critères de confort du label.

Les rayonnements solaires directs et diffus, sont source :

- D'apports solaires par le vitrage, source d'énergie.
- De confort et d'inconfort pour les occupants (lumière du jour, éblouissement...).

Le meilleur moyen de contrôler de manière passive le rayonnement solaire est d'agir avant qu'il n'atteigne le vitrage lui-même, mais nous sommes confrontés au dilemme suivant :

- Les apports solaires sont bénéfiques en hiver, car ils apportent de la clarté, de la lumière et de la chaleur.
- Les apports en été sont source d'inconfort, une augmentation excessive de la chaleur n'est pas bénéfique aux occupants et l'éblouissement direct du soleil est source d'inconfort.

### 4.2.1 Course du soleil

Le meilleur contrôle passif du soleil est par l'utilisation de masques solaires, ceux-ci peuvent prendre la forme de stores, auvents, lamelles voir de type véranda. Un choix judicieux de masque solaire laissera pénétrer la lumière et la chaleur au plus profond de la maison en hiver et bloquera le rayonnement au plus chaud de la journée en été.

La Figure 64 nous montre des images directement issues du modèle informatique pour nous illustrer la hauteur du soleil suivant les quatre époques clefs de l'année, c'est-à-dire aux solstices et équinoxes.

La Figure 64 nous illustre dans l'ordre suivant (à partir de la droite) nous avons :

- Solstices d'hiver, 21 décembre,
- Solstice d'été, 21 juin.
- Les équinoxes 21 mars et 20 septembre sont illustrés en bas

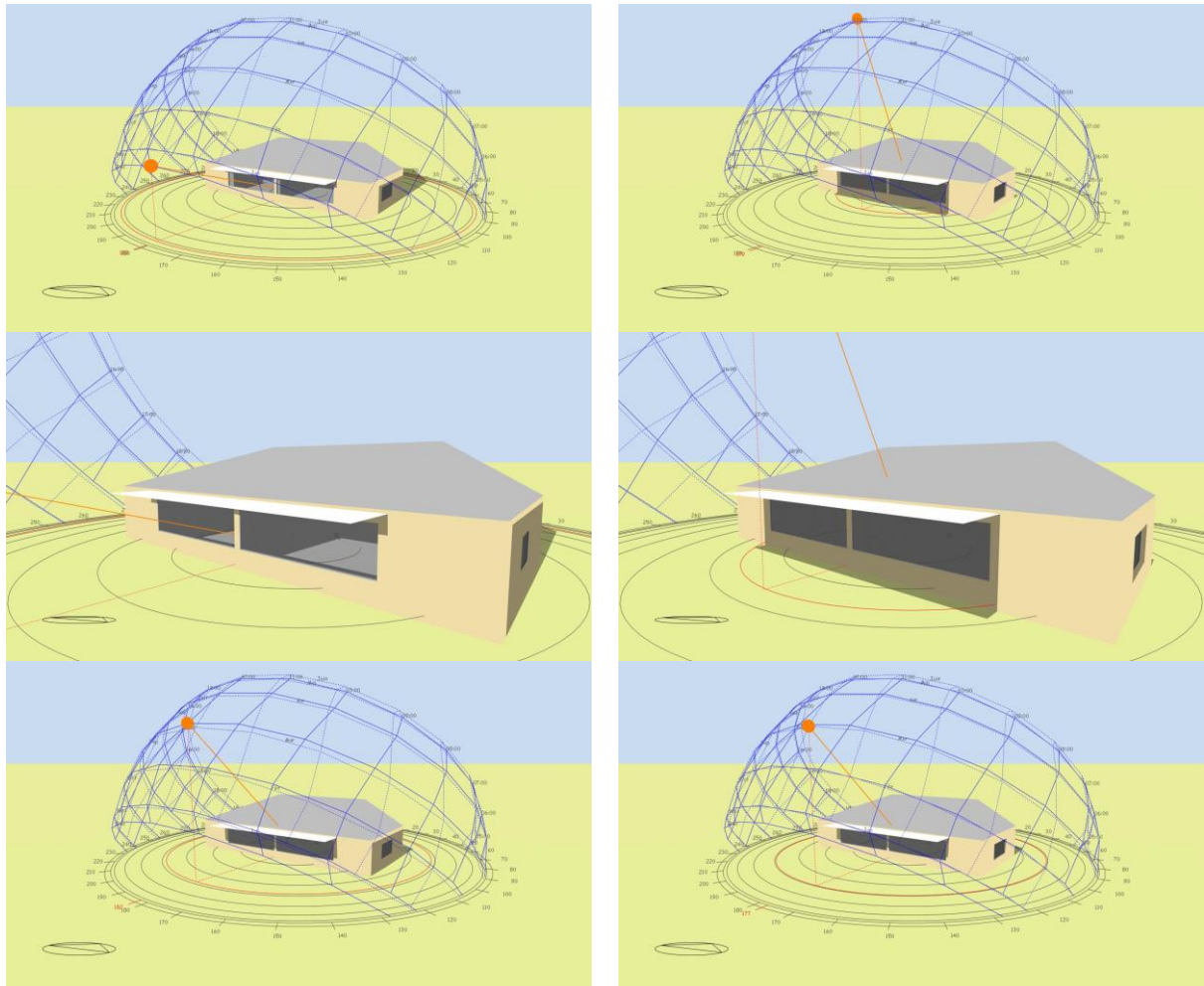


Figure 64 : Rayonnement solaire reçu par le bâtiment à 12 heures.

#### 4.2.2 Masque solaire façade sud : séjour/cuisine

Nous pouvons remarquer sur la Figure 64 l'angle incident du rayonnement solaire direct à différentes périodes de l'année. Nous voyons clairement qu'en hiver, le soleil pénètre effectivement jusqu'à fond du séjour, le masque solaire n'empêche nullement ces apports. Par contre au mois de Juin, le soleil étant plus haut dans l'horizon, le masque solaire formé par une casquette bloque effectivement le rayonnement direct du soleil.

Nous allons optimiser le masque solaire sur la façade Sud de la maison en proposant d'étudier, pour une journée type en été, la différence des apports solaires suivant la profondeur de « casquette » qui sert de brise-soleil (au-delà de 0.5m de profondeur, nous devrions utiliser le terme d'auvent ou pergola mais par simplification nous garderons ce terme). Cette étude se fera sur une journée type, le 15 Juillet et non sur une année complète.

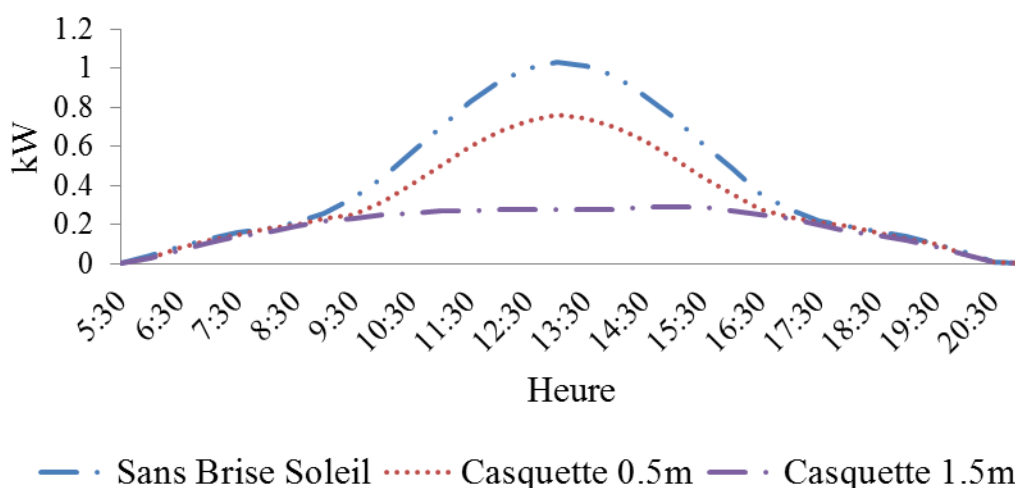


Figure 65 : Influence du masque solaire sur la façade sud, séjour gauche. Les apports solaires (kW) sont donnés pour une journée type en été.

Nous avons donc pour la façade Sud, les profondeurs de casquette allant de 0.5m à 2.5m par incrément de 0.5m (c'est-à-dire 5 types en tout). Il s'agit de limiter les apports solaires en période estivale et laisser pénétrer la lumière et chaleur dans l'habitation en hiver.

Protection	Heure de la Journée							
	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	
Sans	0.13	0.18	0.26	0.44	0.7	0.93	1.03	
0.5m	0.12	0.18	0.23	0.32	0.5	0.68	0.76	
1m	0.11	0.17	0.22	0.25	0.28	0.29	0.33	
1.5m	0.11	0.16	0.22	0.25	0.27	0.28	0.28	
2m	0.1	0.16	0.21	0.24	0.26	0.27	0.27	
2.5m	0.1	0.16	0.2	0.24	0.26	0.27	0.27	
Protection	Heure de la Journée							
	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	
Sans	0.96	0.75	0.49	0.28	0.19	0.14	0.06	
0.5m	0.7	0.54	0.36	0.24	0.19	0.13	0.05	
1m	0.3	0.3	0.28	0.24	0.18	0.13	0.05	
1.5m	0.28	0.29	0.27	0.23	0.17	0.12	0.05	
2m	0.28	0.29	0.27	0.22	0.17	0.11	0.05	
2.5m	0.27	0.28	0.27	0.22	0.16	0.11	0.04	

Tableau 29: Apports solaires (kWh) fenêtres Sud, suivant la profondeur de casquette et l'heure de la journée

Les résultats schématisés sur la Figure 65 nous indiquent qu'en début et en fin de la journée, la profondeur de la casquette n'a pas d'effet sur les apports solaires, ceci est dû au fait que l'altitude du soleil n'est pas suffisante pour être prise en compte par le masque.

Nous allons prendre une profondeur de 1.5m, qui nous permette de bloquer une grande partie du rayonnement. Au-delà de cette profondeur, une étude spécifique sur le bâtiment devra être menée car les effets du vent ne seront non négligeables.

### 4.2.3 Masques solaires pignons Est et Ouest

La problématique des pignons Est et Ouest du bâtiment réside dans le fait que le rayonnement solaire qui atteint ces derniers est soit celui du matin ou du soir, c'est-à-dire que le soleil n'est pas à la verticale donc l'utilisation d'une casquette, comme pour la façade Sud, n'est pas conseillée.

Nous proposons d'étudier deux types de protection solaire :

- Une protection perpendiculaire à la fenêtre (comme un volet droit ouvert).
- Des stores à lamelles incorporées dans la profondeur des murs (orientation de lames différentes). Nous allons modifier l'orientation des lamelles (de 15 à 60° par incréments de 15°).

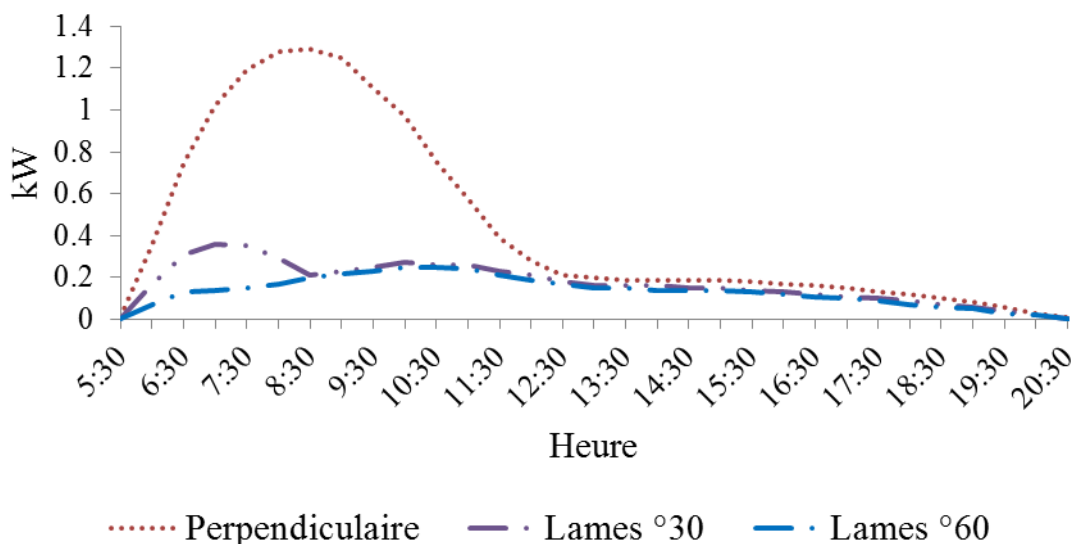


Figure 66: Chambre droite, étude de différents types d'occultations solaires, façade Est. Les apports solaires (kW) sont donnés pour 5h30 à 21h un 15 Juillet.

Les Figure 66 et Figure 67 nous fournissent des précieuses informations quant au pic du rayonnement solaire et des quantités reçues sur les fenêtres.

Il est étonnant de remarquer que nous avons plus d'apports solaires (fenêtre Est ou Ouest) que par rapport à un vitrage façade sud, mais il faut faire attention et ne pas faire de conclusions hâtives car il s'agit d'une journée type en été et non d'une moyenne annuelle,

Sur la façade Est nous observons un pic des apports solaires de 8h à 9h du matin, et sur la façade Ouest le pic est de 17h à 18h. Nous remarquons l'efficacité des stores à lamelles pour réduire les apports solaires sur les deux façades.

La relative inefficacité d'une protection perpendiculaire à la fenêtre (type volet ouvert) s'explique par la course du soleil qui est au plus bas dans le ciel le matin et le soir.

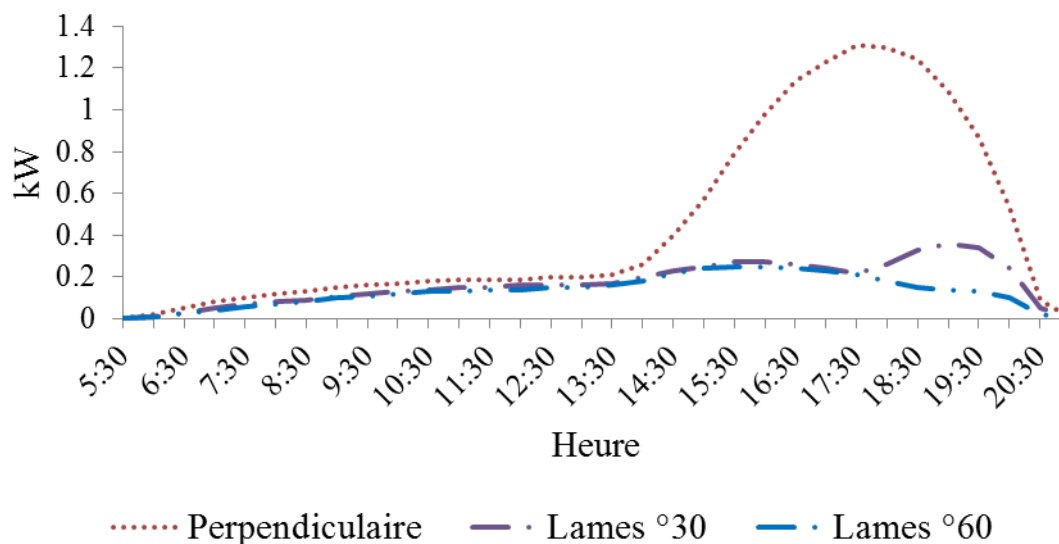


Figure 67: Chambre gauche, étude de différents types d'occultations solaires, façade ouest. Les apports solaires (kW) sont donnés pour 5h30 à 21h un 15 Juillet.

La Figure 68 illustre parfaitement notre problème. Sur la façade Est, il faudra contrôler le rayonnement matinal, au contraire, sur la façade ouest nous devons protéger le bâtiment du rayonnement solaire en fin de journée. Ce raisonnement est valable pour tout bâtiment situé dans l'hémisphère Nord.

Apports Solaires (kW) par heure façade Est suivant type d'occultation					
	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00
Sans Protection	0.36	1.02	1.29	1.26	1.05
Lame Perpendiculaire	0.36	1.02	1.28	1.25	0.97
Store Lamelles °15	0.24	0.55	0.5	0.3	0.28
Store Lamelles °30	0.17	0.36	0.29	0.23	0.27
Store Lamelles °45	0.12	0.22	0.18	0.22	0.26
Store Lamelles °60	0.07	0.14	0.17	0.22	0.25
Apports Solaires (kW) par heure façade Est suivant type d'occultation - suite					
	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Sans Protection	0.66	0.31	0.2	0.2	0.19
Lame Perpendiculaire	0.58	0.28	0.2	0.19	0.19
Store Lamelles °15	0.27	0.22	0.17	0.17	0.16
Store Lamelles °30	0.26	0.21	0.16	0.16	0.15
Store Lamelles °45	0.25	0.2	0.15	0.15	0.14
Store Lamelles °60	0.24	0.19	0.15	0.14	0.14

Tableau 30 : Résultats façade Est, jusqu'à 14 heures.

Les Tableau 30 et 31 nous résument ce constat. Les apports solaires sur la façade Est sont au maximum à 8 heures du matin, nous constatons un flux de 1.29 kW atteignant la surface. Sur la façade Ouest, le pic est à 18 heures et nous avons un flux maximal de 1.31 kW.



Nous allons prendre comme hypothèse simplificatrice que les stores et casquettes sont de type fixe, c'est-à-dire qu'aucune intervention humaine ne sera nécessaire soit pour orienter les lames des stores ou pour agir sur la profondeur de la casquette. Ce qui nous oriente vers les choix suivants :

- Façade sud : auvent/casquette de 1,5 m.
- Façades est et ouest : lames orientées à 30°.

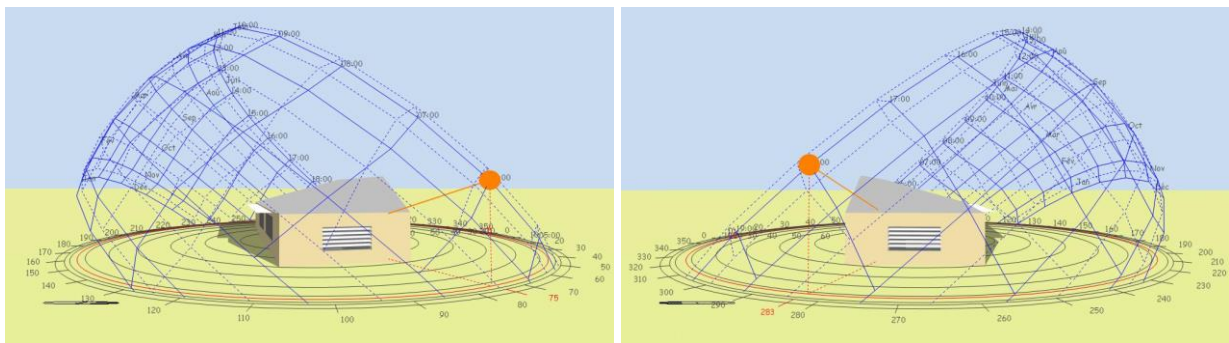


Figure 68: Course du Soleil 15 Juillet. À gauche nous avons le pignon Est à 6h du matin et à droite nous avons la façade Ouest à 18h de l'après-midi.

Apports Solaires (kW) par heure façade Ouest suivant type d'occultation					
	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Sans Protection	0.19	0.2	0.2	0.27	0.58
Lame Perpendiculaire	0.19	0.19	0.2	0.26	0.57
Store Lamelles °15	0.16	0.16	0.17	0.2	0.26
Store Lamelles °30	0.15	0.16	0.16	0.2	0.25
Store Lamelles °45	0.14	0.15	0.15	0.19	0.24
Store Lamelles °60	0.13	0.14	0.15	0.18	0.24
Apports Solaires (kW) par heure façade Ouest suivant type d'occultation - suite					
	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Sans Protection	0.99	1.24	1.31	1.1	0.53
Lame Perpendiculaire	0.98	1.23	1.3	1.09	0.53
Store Lamelles °15	0.28	0.26	0.47	0.56	0.34
Store Lamelles °30	0.27	0.24	0.26	0.36	0.24
Store Lamelles °45	0.26	0.23	0.19	0.22	0.16
Store Lamelles °60	0.25	0.23	0.18	0.14	0.1

Tableau 31 : Résultats façade Ouest, de 11h à 20h.

#### 4.2.4 Résultats et analyse

Le premier constat que nous pouvons faire est qu'effectivement en concevant des brise-soleil adaptés à l'orientation des surfaces vitrées, nous venons quasiment d'annuler les besoins en rafraîchissement du bâtiment.

Cette amélioration se traduit par une consommation moindre mais le gain de consommation totale n'est plus que de 1% par rapport au modèle de base qui nous sert de référence.

Cette différence peut nous paraître quasiment négligeable et nous serons en droit de nous poser la question si oui ou non nous devrions garder les protections solaires.

Cette différence de 1% sur la consommation annuelle du système de CVR entre l'optimisation des vitrages et l'optimisation des protections solaires provient du fait que la consommation de chauffage est en hausse de 11%. Cette hausse de la consommation est due aux manques des apports solaires car les protections jouent un double rôle. Un rôle positif en évitant les surchauffes mais négatif en diminuant les apports solaires qui sont bénéfiques.

Résultats Après Étude des Brise-Soleil			
Poste	Modèle de Base	Optimisation des Vitrages	Étude des Brise-Soleil
Total Consommation CVR	14.34 kWh/m <sup>2</sup>	12.70 kWh/m <sup>2</sup>	14.20 kWh/m <sup>2</sup>
%Temps > 25°C	24.38%	29.86%	3.01%
Puissance Chauffage	4.14 kW	4.02 kW	4.02 kW
Consommation Chauffage	1782.66 kWh	1400.84 kWh	2005.94 kWh
Consommation Rafraîchissement	41.87 kWh	112.66 kWh	4.76 kWh
Ventilateurs	315.16 kWh	381.92 kWh	107.96 kWh
Récupération de Chaleur : Rafraîchissement	4.68 kWh	6.43 kWh	0.97 kWh
Récupération de Chaleur : Chauffage	1790.01 kWh	1790.2 kWh	1811.14 kWh

Tableau 32 : Ensemble des résultats après l'optimisation des brise-soleil.

Les plus grands bénéfices sont apparents sur la Figure 69. Nous remarquons nettement les améliorations quant au niveau du confort acceptable et ce tout au long de l'année.

Un petit bémol est le constat en mi-saison d'un autre problème, car le rayonnement solaire qui atteignait le bâtiment influait de manière bénéfique sur les critères de confort. Mais

malheureusement nous ne pouvons plus compter là-dessus et nous devons maintenant nous tourner vers une optimisation des parois opaques pour trouver une solution au critère de confort.

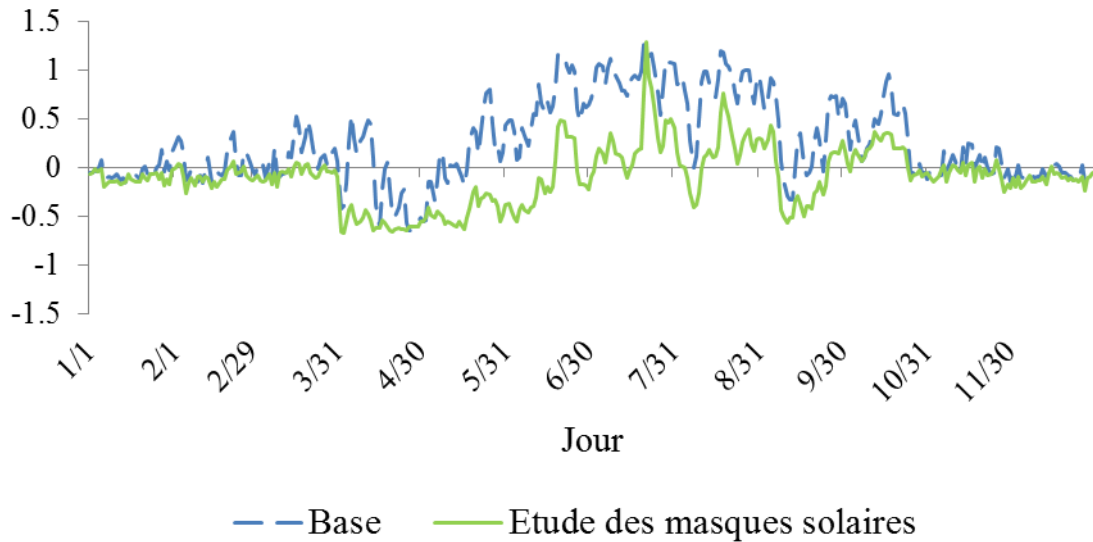


Figure 69: Comparaison courbe de Fanger modèle de Base et modèle avec l'Étude des Brise-Soleil.

Il est intéressant de noter, aussi bien sur Figure 69 et sur la Figure 70, l'influence des brise-soleil sur le confort thermique et la température opérative. Nous pouvons constater une légère surchauffe en période estivale, avec comme conséquence deux pics d'inconfort.

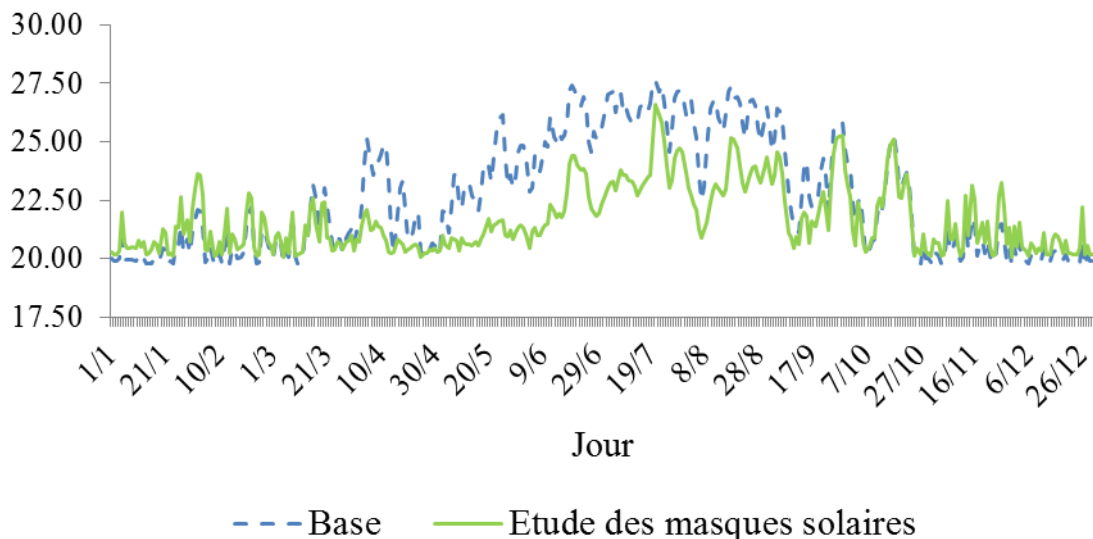


Figure 70 : Température opérative, modèle de Base et optimisation des brise-soleil.

Au final, nous sommes largement en dessous du seuil de 10% du temps  $> 25^{\circ}\text{C}$ , nous avons seulement 3,01% et ce grâce à l'étude des brise-soleil qui contrôlent le rayonnement direct du soleil mais nous n'avons pas encore optimisé les murs et les paramètres ne sont pas totalement définis et nous éviterons toute conclusion avant ce dernier travail.

## 4.3 Optimisation des murs

### 4.3.1 Rappel de la typologie des murs

Nous allons procéder aux mêmes calculs que pour les vitrages, un calcul paramétrique qui nous permet d'apporter une première analyse quant aux choix constructifs. Nous avons trois typologies de murs distincts (le détail est donné en Tableau 33) :

- Type 1 : mur bois, ossature principale en poutrelles bois ajourées en forme de I ce qui permet de minimiser les ponts thermiques. Les poutrelles permettent d'avoir une sur épaisseur d'isolant, ceci est un des principaux types de construction mis en œuvre dans les maisons Passives.
- Type 2 : Système porteur composé de panneaux de bois massif laminés, une option intéressante par rapport à la première typologie.
- Type 3 : Mur maçonné composé de blocs de béton léger et d'un isolant rigide incorporé.

Nomenclature	Type de Construction	Épaisseur de l'Isolant m	Coefficient U de l'ensemble W/m <sup>2</sup> K
Base		0.15	0.15
1a	Système bois	0.2	0.145
1b	avec poutrelles	0.25	0.124
1c	ajourées en «I ».	0.3	0.108
1d	Isolant à base de fibres de bois	0.175	0.161
2a	Panneaux de	0.17	0.148
2b	bois massif	0.22	0.118
2c	laminés. Isolant	0.27	0.098
2d	en polystyrène extrudé	0.15	0.165
3a	Blocs de béton	0.15	0.151
3b	léger. Isolant en	0.20	0.124
3c	polystyrène	0.25	0.105
3d	expansé	0.12	0.174

Tableau 33 : Rappel des typologies de murs.

Les variantes sont sur l'épaisseur de l'isolant, les résultats sont donnés par typologie Type 1a, 1b et ainsi de suite. Le vitrage utilisé pour les calculs correspond à ceux de l'optimisation, de même pour les protections solaires. Nous allons étudier en détail les paramètres suivants :

- Le charge de chauffage global.
- Charge de chauffage façade sud : salon.
- La degré de confort.
- Consommation totale d'énergie.
- Commentaire sur les écarts de températures calculées.

Lors du calcul des besoins en chauffage le logiciel nous détermine une température moyenne du bâtiment. Cette dernière, a priori, pouvait nous servir d'indicateur pour le choix sur la typologie de mur à adopter, mais il en est tout autre.

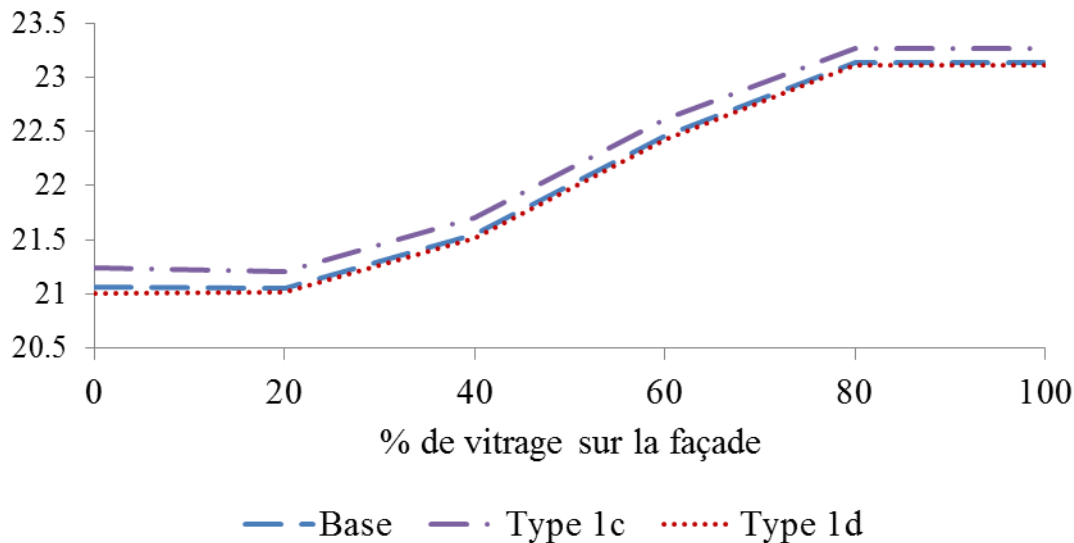


Figure 71: Moyenne des températures (°C) en fonction de la surface vitrée.

Ceci nous est illustré sur la Figure 71 où nous comparons la différence des températures calculées pour le mur du modèle de base et les Types 1c et 1d (l'épaisseur d'isolant le plus épais et le moins épais). Nous ne pouvons constater de différence entre les épaisseurs d'isolants et même la différence avec le modèle de Base est quasiment négligeable. Le Tableau 34 nous résume notre problématique :

Pourcentage Vitré (%)	Température Minimale (°C)	Température Maximale (°C)	$\Delta$
0	20.95	21.28	0.33
20	20.97	21.24	0.27
40	21.47	21.74	0.27
60	22.38	22.64	0.26
80	23.07	23.3	0.23
100	23.07	23.3	0.23

Tableau 34: Températures moyennes annuelles constatées tous types de façades confondues.

Nous ne pouvons donc pas nous servir comme indice les températures moyennes constatées, car elles sont trop proches pour pouvoir en tenir une quelconque conclusion. Nous devons donc trouver un autre moyen de différencier les types des murs et pour cela, nous allons aborder dans un premier temps la charge de chauffage, c'est-à-dire la puissance nécessaire pour amener la température interne au niveau de confort voulu en hiver.

### 4.3.2 Charge de chauffage

L'intérêt de l'enveloppe d'un bâtiment passif est d'offrir un optimum de confort tout en réduisant au maximum les déperditions énergétiques. La charge de chauffage d'un bâtiment est un bon indicateur quant à la qualité de l'enveloppe lui-même et sa capacité à limiter la transmission énergétique à travers ces parois opaques. Les résultats suivants appliquent la même méthodologie que précédemment, sauf que maintenant nous nous intéressons à la partie opaque de l'enveloppe.

Charge de Chauffage (kWh)							
	Base	Type 1a	Type 1b	Type 1c	Type 1d	Type 2a	Type 2b
0	673.44	640.62	564.12	508.38	689.73	657.24	544.31
20	861.21	842.41	760.06	702.84	893.14	840.74	734.14
40	975.55	948.62	866.58	808.21	1001.48	948.44	839.65
60	1074.86	1042.19	958.06	899.15	1095.91	1041.34	929.78
80	1075.29	1036.88	954.97	898.58	1089.11	1035.89	927.99
100	1075.29	1036.88	954.97	898.58	1089.11	1035.89	927.99
Charge de Chauffage (kWh) - suite							
	Type 2c	Type 2d	Type 3a	Type 3b	Type 3c	Type 3d	
0	474.05	721.1	653.9	558.63	494.14	735.01	
20	665.94	900.13	852.56	753.69	687.03	937	
40	768.87	1010.86	956.2	856.16	788.18	1041.16	
60	857.48	1105.27	1043.72	942.29	874.15	1130.01	
80	858.99	1097.36	1040.07	942.25	877.09	1123.35	
100	858.99	1097.36	1040.07	942.25	877.09	1123.35	

Tableau 35: Charge de chauffage suivant le type de murs et le pourcentage vitré.

Nous constatons une nette différence entre les diverses épaisseurs d'isolants indépendamment du support, Type 1 et Type 2 structure porteuse en bois et le mur de Type 3 à une structure béton. Nous pouvons aussi remarquer que les valeurs semblent se stabiliser à partir de 60% de la façade vitrée, c'est-à-dire que les pertes sont compensées par les gains à travers le vitrage.

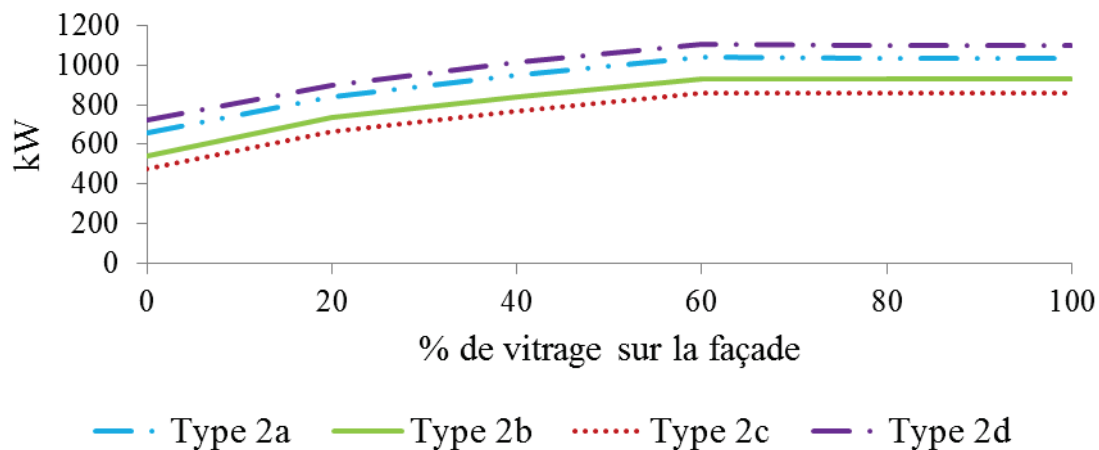


Figure 72: Charge de chauffage en kWh suivant le type de mur et le pourcentage de façade vitrée.

Nous pouvons constater un palier de la charge de chauffage à partir d'une surface vitrée égale à 60%. Nous pensons logiquement aux apports gratuits qui deviennent suffisants pour compléter les besoins en chauffage de la maison à partir d'un certain pourcentage de façade vitrée, mais il faudra analyse en détail une façade. Nous optons pour étudier la façade Sud, donc les séjours.

### 4.3.3 Façade sud

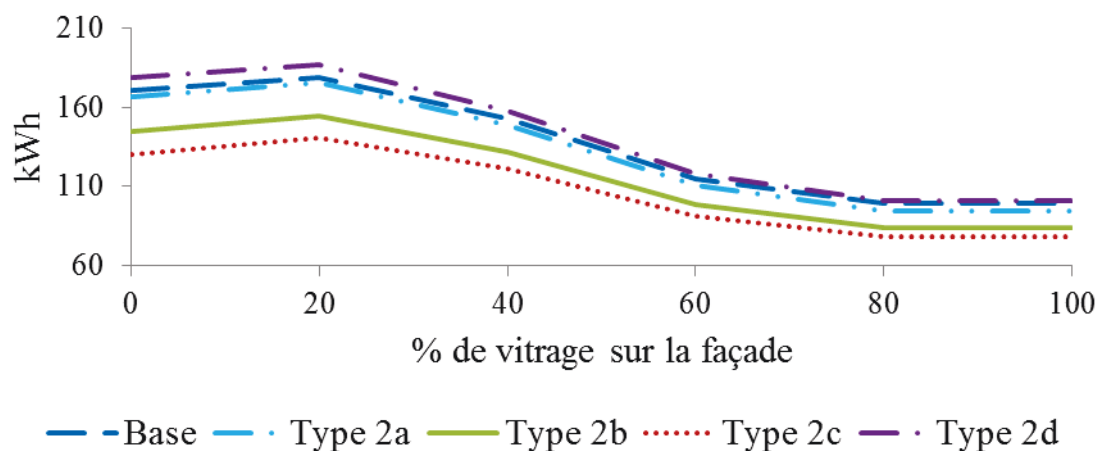


Figure 73: Charge de chauffage (kWh) façade sud, séjour, suivant le pourcentage de façade vitrée et les trois types de murs pour le mur Type 2.

Nous allons étudier en détail la façade sud du bâtiment car, a priori, nous pouvons peut-être encore croître la surface vitrée par rapport à la surface du mur. Les apports gratuits suffiront à chauffer toute pièce au sud et le chauffage ne vient qu'en supplément en tant qu'appoint.

La conception de l'enveloppe d'un bâtiment passif doit non seulement être performante, limiter les déperditions, mais doit aussi utiliser toute source naturelle d'apports de chaleur.

La Figure 73 nous montre que nous pouvons effectivement concevoir une enveloppe de bâtiment qui optimise ses apports gratuits, la charge de chauffage trouve un optimal pour une façade vitrée de 80% sur la façade Sud et ceci est dû à la fois à la combinaison de murs et de vitres performants.

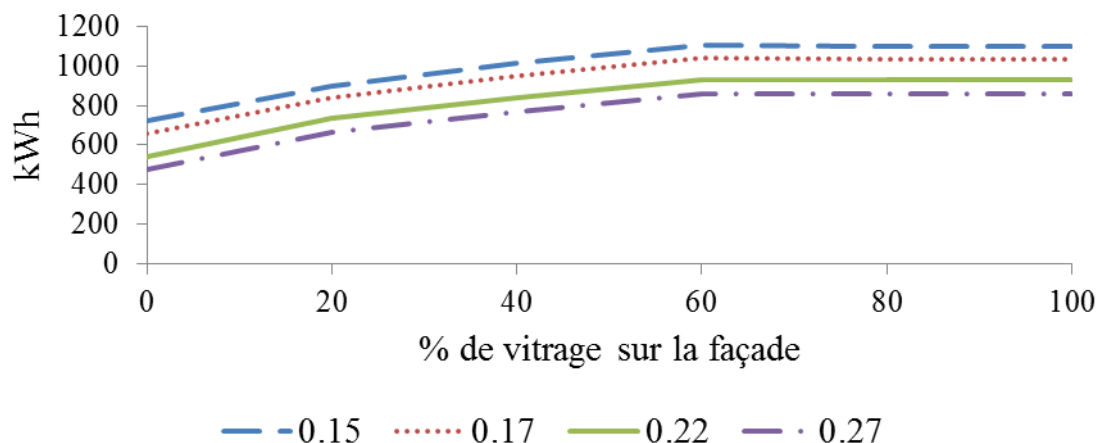


Figure 74: Mur Type 2, charge de chauffage en kWh suivant l'épaisseur de l'isolant.

Il est intéressant de constater que la Figure 74 nous illustre le fait que nous n'avons pas de différence de charge de chauffage pour une façade vitrée à 80% ou 100% et ce quelle que soit l'épaisseur de l'isolant. Mais cette comparaison doit se faire surtout suivant les consommations annuelles. De même nous pouvons remarquer qu'une façade vitrée à 60% est plus énergivore, de peu certes mais la différence existe. Le Tableau 36 suivant nous fournit l'ensemble des résultats obtenus que nous puissions constater sur la Figure 74.

Si effectivement, la consommation de chauffage suivait une règle strictement linéaire par rapport à l'épaisseur de l'isolant, nous pourrions espérer arriver à une valeur nulle en augmentant simplement de ce dernier. A priori, il suffira d'augmenter l'épaisseur de l'isolant pour atteindre une « hyper enveloppe » qui ne nécessitera aucun système « actif » pour les besoins de chauffage, mais nous avons un problème liée aux propriétés du matériau lui-même. La Figure 75 expose notre problématique.

	Type 2d	Type 2a	Type 2b	Type 2c
	0.15 m	0.17 m	0.22 m	0.2 m
0	721.1	657.24	544.31	474.05
20	900.13	840.74	734.14	665.94
40	1010.86	948.44	839.65	768.87
60	1105.27	1041.34	929.78	857.48
80	1097.36	1035.89	927.99	858.99
100	1097.36	1035.89	927.99	858.99

Tableau 36 : Résumé des résultats de la charge de chauffage (kWh) suivant l'épaisseur de l'isolant et le pourcentage de surface vitrée.



Comme nous pouvons le voir, la valeur du coefficient U d'un matériau donné n'est pas linéaire mais suit une progression logarithmique. C'est-à-dire que l'optimal énergétique et économique ne se trouve pas simplement dans l'isolant le plus épais, car nous devons aussi tenir compte du confort thermique.

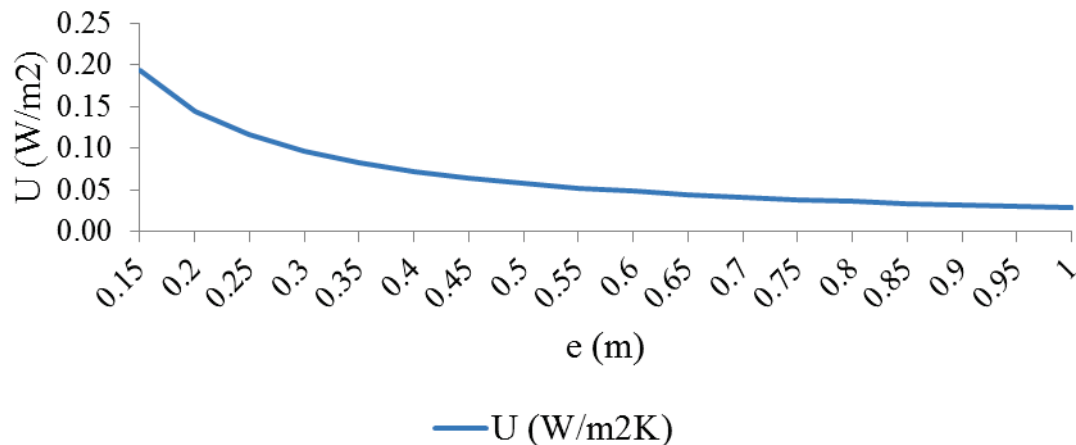


Figure 75: Valeur du coefficient d'échange, ordonnées, thermique suivant épaisseur du matériau, abscisses. Il s'agit du polystyrène expansé hautes performances utilisé dans le mur Type 2.

#### 4.3.4 Le confort

Nous pouvons faire le même constat que pour les températures, nous nous apercevons que le facteur de confort ne varie guère suivant le type de mur ou l'épaisseur de l'isolant, Figure 76. Nous avons quasiment le même indice de confort et ce tout type de mur confondu.

Il apparaît que nous avons un optimal, tout type de mur confondu, de confort pour une façade vitrée entre 40 et 60%, mais nous devons analyser la consommation énergétique avant d'apporter toute conclusion car l'indice de confort ne nous permettra pas de trancher sur le choix des murs.

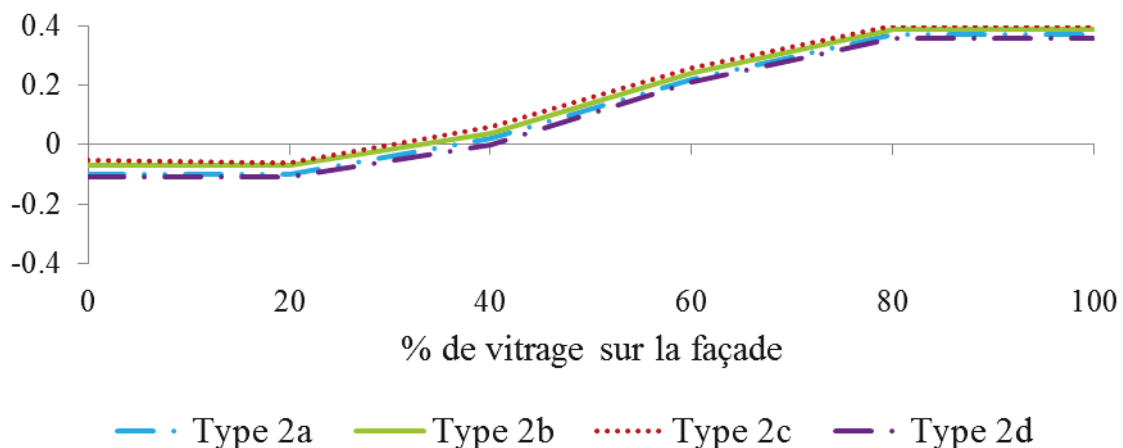


Figure 76 : Index Fanger suivant la typologie de murs et le pourcentage de la façade vitrée.

### 4.3.5 Consommation totale d'énergie

Consommation Totale d'Énergie (kWh)							
	Base	Type 1a	Type 1b	Type 1c	Type 1d	Type 2a	Type 2b
0	3561.44	3534.06	3422.89	3341.9	3604.55	3545.26	3395
20	2857.15	2833.49	2724.91	2647.05	2902.43	2837.13	2693.71
40	2864.9	2836.22	2727.69	2651.24	2903.55	2839.68	2697.74
60	2896.17	2857.38	2749.7	2676.48	2924.49	2858.69	2719.44
80	3036.76	2994.47	2893.97	2823.57	3059.16	2993.92	2862.38
100	3036.76	2994.47	2893.97	2823.57	3059.16	2993.92	2862.38
Consommation Totale d'Énergie (kWh)							
	Type 2c	Type 2d	Type 3a	Type 3b	Type 3c	Type 3d	
0	3296.3	3630.18	3559.75	3423.27	3328.94	3674.34	
20	2600.59	2918.98	2869.13	2736.35	2645.09	2980.2	
40	2604.94	2918.66	2867.41	2736	2646.43	2977.82	
60	2627.62	2937.08	2875.68	2748.38	2660.43	2984.65	
80	2777.64	3069.15	3009.46	2887.82	2806.91	3111.02	
100	2777.64	3069.15	3009.46	2887.82	2806.91	3111.02	

Tableau 37 : Consommations suivant la typologie des murs.

La condition prioritaire est la limitation des consommations énergétiques, donc nous allons analyser en détail les résultats donnés dans le Tableau 37 et Figure 75.

Les isolants ont été modélisés à partir de l'épaisseur minimale pour pouvoir atteindre la certification Passivhaus, c'est-à-dire une valeur minimale du coefficient d'échange thermique  $U = 0.15 \text{ W/m}^2$ , cette épaisseur a été augmentée par incréments de 5cm.

Il n'est donc pas surprenant de constater les meilleurs résultats avec une plus épaisse couche d'isolation, mais ce qui est plus surprenant est de constater la meilleurs performances venant d'un isolant à base de polystyrène expansé (léger) plutôt que des matériaux offrant une inertie plus forte, tel la combinaison de blocs de béton et de polystyrène ou l'isolant à base de fibre de bois. Nous pouvons aussi constater les meilleures performances pour une façade vitrée entre la proportion de 20 et 40% sur la façade Sud.

➤ Résumé sur l'optimisation des parois opaques:

- Les meilleures performances pour le mur Type 2c,
- Un maximum de 40% vitrée sur l'ensemble de la maison et de 60% pour la façade Sud comme nous l'avons établi auparavant.

#### 4.3.6 Résultat finaux et analyse du confort

Résultats Optimisation des Murs				
Poste	Modèle de Base	Optimisation des Vitrages	Étude des Brise-Soleil	Optimisation des Murs
Total Consommation CVR	14.34 kWh/m <sup>2</sup>	12.70 kWh/m <sup>2</sup>	14.20 kWh/m <sup>2</sup>	11.90 kWh/m <sup>2</sup>
%Temps > 25°C	24.38%	29.86%	3.01%	1.10%
Puissance Chauffage	4.14 kW	4.02 kW	4.02 kW	3.88 kW
Consommation Chauffage	1782.66 kWh	1400.84 kWh	2005.94 kWh	1663.28 kWh
Consommation Rafraîchissement	41.87 kWh	112.66 kWh	4.76 kWh	5.17 kWh
Ventilateurs	315.16 kWh	381.92 kWh	107.96 kWh	107.48 kWh
Récupération de Chaleur : Rafraîchissement	4.68 kWh	6.43 kWh	0.97 kWh	0.93 kWh
Récupération de Chaleur : Chauffage	1790.01 kWh	1790.2 kWh	1811.14 kWh	1860.12 kWh

Tableau 38 : Ensemble des résultats par étape avec optimisation finale.

Le Tableau 38 nous résume les résultats obtenus, étape par étape de l'optimisation de l'enveloppe de manière « passive ». L'optimisation des murs a pu de nouveau diminuer la consommation énergétique pour les besoins du système de CVR de l'ordre de 17% au total.

Nous avons pu « pallier » en quelque sorte le manque d'apports gratuits causés par l'effet des brise-soleil par une augmentation de l'épaisseur de l'isolant. Mais il ne faut pas oublier que les gains ne sont pas seulement énergétiques (il paraît difficile de justifier une augmentation de l'isolant seulement sur un aspect énergétique), nous gagnons surtout dans les critères de confort. Les pics d'inconfort en été sont réduits et nous ne pouvons constater dorénavant qu'une seule période où les critères de confort ne sont pas respectés.

Regardons de plus près la courbe de Fanger (Figure 77) nous pouvons remarquer toujours des pics d'inconfort et plus de fluctuations qu'auparavant, et il sera intéressant de comparer la courbe avec l'optimisation des brise-soleil et celle de l'optimisation des murs.

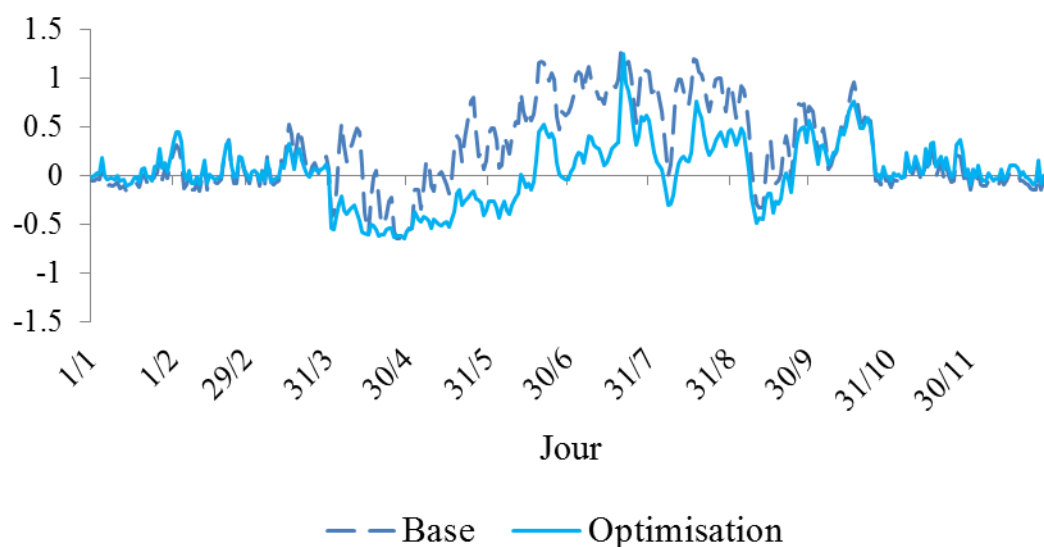


Figure 77 : Comparaison des courbes de Fanger modèle de Base et modèle avec l'Optimisation des Murs

Nous pouvons nous poser la question suivante : puisque nous n'avons quasiment aucune consommation pour les besoins de rafraîchissement, sommes-nous toujours liés pour l'étude du confort au modèle de Fanger ? La réponse suivant la norme est non. Nous pouvons dire que nous avons trouvé une solution passive à l'optimisation d'une maison individuelle (Figure 77 et Figure 78). Nous ne constatons aucune surchauffe réelle dont il faudra s'inquiéter, que ce soit sur la courbe de Fanger ou de la température opérative.

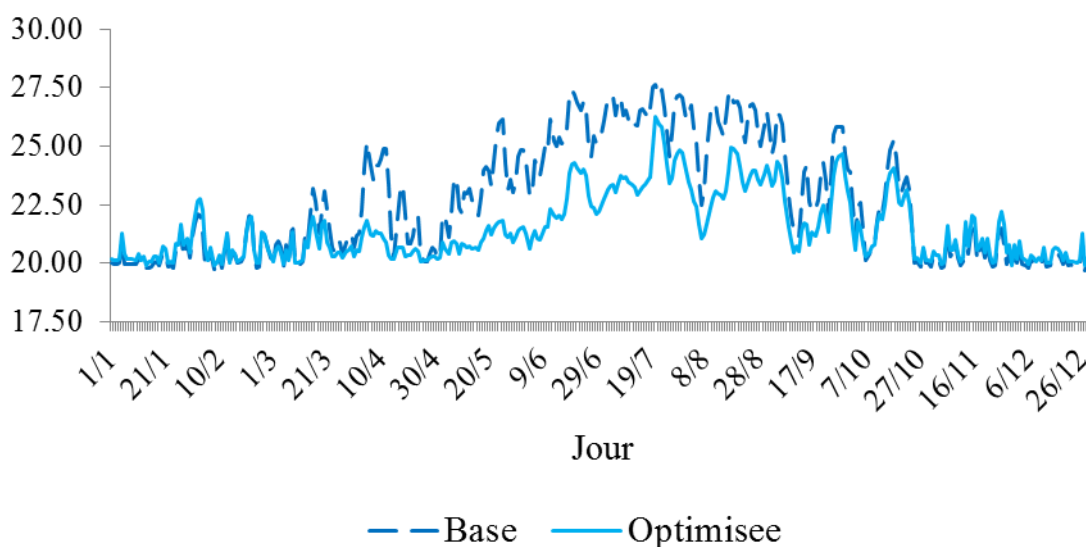


Figure 78 : Température opérative modèle de base et modèle optimisé.

Nous pouvons remarquer que sur le modèle optimisé dépassons le seuil des 25 °C avec seulement 1,10 % du temps bien en dessous des recommandations de 10% du temps. Nous avons pu parvenir à ce résultat en agissant simplement sur les composants de l'enveloppe, et nous pouvons parler dès lors d'une véritable optimisation.

## Conclusion

La simulation thermique dynamique est un outil d'une très grande précision qui nous a permis une optimisation avancée d'une enveloppe de bâtiment déjà performant par rapport aux bâtiments usuels construits aujourd'hui. Nous avons pu constater que les critères minima à respecter d'enveloppe nous apportent déjà une solution qui respecte les performances minimales à atteindre. Mais nous avons pu aller au-delà de ce seuil et ce grâce à l'utilisation de la simulation thermique dynamique.

Mais il est important souligner les limitations d'un tel outil et, paradoxalement, c'est en connaissant ces limites que l'outil devient une aide de conception précieuse. Nous établissons un modèle informatique sur la base d'informations et d'hypothèses de calcul qui seront implantées dans un modèle informatique, des étapes apparemment simples mais aux conséquences non négligeables sur les résultats.

La première concerne directement l'expérience du modéleur et sa sensibilité vis-à-vis de l'outil même car, en effet il faut un temps d'apprentissage non négligeable pour pouvoir maîtriser la Simulation Thermique Dynamique et ce malgré souvent une interface utilisateur graphique (GUI) d'apparence simple et ludique.

La deuxième limitation provient de la difficulté à modéliser un comportement humain au sein d'un modèle informatique. Par exemple, nous ne pouvons prédire avec exactitude l'arrivée exacte de chaque personne (qui dit personne dit apports thermiques ou ambiance à traiter), mais nous devons définir une plage de temps. De même, nous ne pouvons pas savoir si cette même personne éteint les lumières dans son bureau s'il y a suffisamment de lumière naturelle. Les avancées dans la simulation dynamique tendent à tenir compte de cette improbabilité du comportement humain, mais cette approche n'est encore que du domaine de la recherche et est peu répandue.

Un autre facteur de limitation provient de l'ensemble du bâtiment lui-même et de la performance supposée des matériaux de construction et des équipements. Qu'en est-il de la prise en compte de la vétusté des appareils, des pertes de charge réseau dues au manque d'entretien ? De même que pour le comportement humain, des avancées sont faites pour tenir compte dans les calculs du vieillissement des systèmes et de l'enveloppe du bâti.

Mais une fois les limitations comprises et affranchies, cet outil nous ouvre les portes vers d'autres possibilités d'optimisation et de recherche de l'efficacité énergétique des bâtiments. Nous avons étudié les assemblages de vitrages plutôt, veuillez nous excuser du terme, classique. Le triple vitrage n'est plus le nec le plus ultra dans le domaine et nous pouvons développer des ensembles de fenêtres avec des coefficients U du même niveau que les murs.

L'avenir proche est prometteur et les innovations à venir promettent encore plus de confort et de minimisation des impacts énergétiques des bâtiments. En effet, les nouveaux isolants minces et ultra performants, les isolants transparents, les matériaux à changement de phase pour stocker, puis restituer l'énergie n'en sont que quelques exemples. La simulation

thermique dynamique joue un rôle primordial car il représente l'outil de calcul idéal pour apporter une vision holistique du bâtiment, c'est-à-dire une vision d'ensemble qui permet une analyse pertinente du comportement global d'un édifice. Les nouvelles frontières ouvertes par cet outil ne concernent pas seulement les matériaux et l'échelle du bâtiment, car grâce la montée en puissance des stations de travail informatiques, il devient possible de simuler à l'échelle urbain. Nous pouvons désormais déterminer à une échelle urbaine les mêmes caractéristiques de rayonnement reçu par les surfaces, les consommations énergétiques, les facteurs lumière du jour, le confort à l'échelle urbaine ... mais ce ne sont que quelques pistes dont la découverte et l'acheminement est possible grâce à un outil qui est apparu il y a maintenant presque 40 ans ....

## Références

---

i

Le site International Energy Agency – Agence Internationale de l'Énergie – Agence fondée en Novembre 1974 – siège social à Paris, France - <http://www.iea.org/about/indexfr.asp>

ii H.HORSTER, B.STEINMULLER et autres : La « Maison Expérimentale Philips » - Allemagne - construit en 1980

iii A. and H. LOVINS : Le « Rocky Mountain Institute » - États Unis - construit en 1978

iv Programme d'étude THERMIE - Programme Européen de construction de 250 Maisons Passives – Durée 3 ans de 1998 à 2001 - <http://www.cepheus.de/eng/index.html>

v International Passive House Association - <http://www.passivehouse-international.org/>

vi Magazine « Informationsdeinst Holtz – Das Passivhaus – Energie – Effizientes – Bauen » Octobre 2002 – Munich – Allemagne

vii NF EN ISO 6946 : Composants et Parois de Bâtiments – Résistance Thermique et Coefficient de Transmission Thermique – AFNOR 2003

viii Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, des Transports et du Logement. Décret n°2012-518 du 19 Avril 2012 relatif au label “Bâtiment Biosourcé”

ix NF EN ISO : Performance Thermique des Bâtiments – Transfert de Chaleur par le Sol – Méthodes de Calcul – AFNOR 1999

x Memento SAINT GOBAIN GLASS – 2007 – [www.saint-gobain-glass.com](http://www.saint-gobain-glass.com)

xi Optics 5.1 – Logiciel du Lawrence Berkeley National Laboratory <http://windows.lbl.gov/software/optics/optics.html>

xii

Dr. WOLFGANG FEIST, Dipl.- Ing. SØREN PEPER, Dipl. – Phys. OLIVER KAH, Dipl.-Ing. MATTHIAS VON OESEN « Climate Neutral Passive House Estate in Hannover-Kronsberg : Construction and Measurement Results » - Hannover 2001, English 2005 – Passivhaus Institut – Sponsored project by the European Commission, Project Number : BU/0127/97

O.SEPPÄNEN – « Ventilation strategies for good indoor air quality and energy efficiency », *IAQ and Energy – 2003* – ASHRAE – Atlanta G.A. pp257-276

xiii O.SEPPÄNEN – « Building Ventilation – State of the Art » - *CH 9 The Effect of Ventilation on Health and Other Human Responses* – 2006 - AICV

xiv

---

Frank P. INCORPERA, David P. DEWITT “Fundamentals of Heat and Mass Transfer” 4<sup>ème</sup> Edition – John Wiley & Sons 1996

xv Norme NF EN ISO 7730 : Ambiance Thermiques Modérées – Détermination des Indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique – AFNOR 2005

xvi EN ISO 15927-1, Performance hygrothermique des Bâtiments – Calcul et Présentation des données climatiques – Partie 1 : Moyennes mensuelles et annuelle des éléments météorologiques simples et disponible – AFNOR 2005

xvii NF EN ISO 13790 – Calcul de Besoins d’Énergie pour le Chauffage des Locaux – AFNOR 2004

xviii METEONORM V7.0.18.20242 - Copyright© 2012 METEOTEST Genossenschaft – meteonorm.com

xix Nilan Compact P : <http://www.nilan.dk/fr-FR/Premiere-page/Solutions/Solutions-particuliers/Solutions-compl%C3%A8tes/Compact-P.aspx>

xx Energy Plus Documentation – version 7.2, October 2012 © 1998-2012 The Board of Trustees of the University of Illinois and The Regents of the University of California

xxi NF EN ISO 13788 - Performance Hygrothermique des Bâtiments -Température Superficielle Intérieure Permettant d’Éviter l’Humidité Superficielle Critique et la Condensation dans la Masse – Méthode de Calcul – AFNOR Décembre 2001

xxii Institut de la Maison Passive – Les Prérequis – Certification des Murs et des Systemes de Construction – Chapitre 7 : Installation des Fenêtres - Pamphlet édité par le IMP et disponible sur leur site