



HAL
open science

Etude des transferts de chaleur dans les enveloppes de constructions bois

Alexandre Delanoy, Joseph Legros

► **To cite this version:**

Alexandre Delanoy, Joseph Legros. Etude des transferts de chaleur dans les enveloppes de constructions bois. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2012. hal-01873239

HAL Id: hal-01873239

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01873239>

Submitted on 13 Sep 2018

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Rapport de Projet de Fin
d'Etudes
Ingénieur 3^{ème} année
- Promotion 2012 -**

**Etude des transferts de chaleur dans les
enveloppes de construction bois.**

Study on heat transfer in wood buildings' walls



**DELANOY Alexandre
LEGROS Joseph
2011 / 2012**

Enseignant responsable : MOUGEL Eric

Co-encadrants : REMOND Romain et RAFIDIARISON Helisoa

AVANT PROPOS

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes qui nous ont assistées pour notre Projet de Fin d'Etude :

- Helisoa Rafidiarison qui effectue sa thèse sur le projet TRANSBATIBOIS. Elle nous a beaucoup épaulés par sa connaissance sur le projet et sur l'obtention des résultats.
- Eric Mougel, notre encadrant de PFE, qui nous guidé tout au long de l'évolution de notre avancement.
- Romain Remond pour ses précieux conseils sur le rayonnement solaire.
- Tristan pour sa disponibilité.
- L'ensemble du personnel technique, des enseignants chercheurs et des thésards.

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	1
INTRODUCTION.....	8
PARTIE 1 : DESCRIPTION DES MODULES ET HYPOTHESES.....	9
1. MODE CONSTRUCTIF	9
1.1. Ossature bois	9
1.2. Panneau contrecollé	10
1.3. Murs empilés.....	11
2. ELEMENTS COMMUNS AUX MODULES	13
3. LE MODULE ACMB.....	15
3.1. Description	15
3.2. Hypothèses avancées	16
4. LE MODULE KLH	16
4.1. Description	16
4.2. Hypothèses avancées :	18
5. LES MODULES ECOLOGGIA 1 & 2	18
5.1. Description	18
5.2. Hypothèses avancées :	21
6. LE MODULE MADRIER	21
6.1. Description	21
6.2. Hypothèses avancées :	22
PARTIE 2 : DETERMINATION DES PONTS THERMIQUES :.....	23
1. DESCRIPTION GENERALE :	23
2. DESCRIPTION DU LOGICIEL THERM :	23
3. PROCEDURE DE CALCUL SUIVANT LA NORME NF EN ISO 10211 :	23
3.1. Principe.....	23
3.2. Modélisation de la géométrie :	24
3.3. Caractéristiques thermiques des matériaux.....	24
3.4. Conditions aux limites	24
3.5. Calcul numérique et exploitation des résultats :	25
4. DONNEES POUR LE CALCUL DES PONTS THERMIQUES :	26
4.1. Modélisation	26
4.2. Caractéristiques thermiques des matériaux.....	26
4.2.1. Lames d'air	26
4.2.2. Caractéristiques thermiques des matériaux	28
4.3. Conditions aux limites	28
4.3.1. Conditions de flux	28
4.3.2. Conditions d'ambiance	29
4.3.3. Modélisation des murs ossature bois	29
5. RESULTATS :	30
PARTIE 3 : FICHER METEO	32
1. INTRODUCTION.....	32
2. ESTIMATION DU RAYONNEMENT DIFFUS.....	32
2.1. Généralités sur le rayonnement solaire :	32
2.2. Méthode de détermination du rayonnement diffus.....	33
2.3. Limites de l'évaluation du rayonnement diffus	38
2.4. Validation de la valeur du rayonnement diffus	39
3. CREATION DU FICHER METEO.....	42

3.1. Démarche générale.....	42
3.2. Démarche détaillée.....	42
PARTIE 4 : PUISSANCE ARMOIRE ELECTRIQUE.....	44
1. PRESENTATION.....	44
2. METHODE D'ESTIMATION DE LA PUISSANCE.....	44
3. RESULTAT DE LA PUISSANCE.....	45
PARTIE 5 : MODELISATION	46
1. INTRODUCTION.....	46
2. PRESENTATION DU LOGICIEL ALCYONE	46
2.1. Introduction	46
2.2. Modélisation	46
3. PRESENTATION DU LOGICIEL PLEIADE+COMFIE.....	48
3.1. Introduction	48
3.2. Saisies des données.....	48
3.3. Données d'entrée	49
3.4. Analyse des données	50
4. LOGICIEL COMFIE.....	51
PARTIE 6 : RESULTATS.....	52
1. REPARTITION DES DEPERDITIONS.....	52
1.1. Introduction	52
1.2. Le module ACMB.....	52
1.3. Répartition moyenne des déperditions thermiques	54
2. FICHIER METEO – PERIODE DE SIMULATION.....	55
3. COMPARAISON DES MODELISATION	55
3.1. Introduction	55
3.2. Besoin de chauffage / Puissance de chauffe	56
3.3. Déphasage et amortissement	57
4. CONFRONTATION DES MODELISATIONS AVEC LES MODULES REELS.....	58
4.1. Introduction	58
4.2. Besoin totaux de chauffage sur la période du 1 décembre au 5 février	59
4.3. Besoin de chauffage sur la semaine la plus chaude/la plus froide sur cette même période.....	59
4.4. Comparaison dynamique pourcentage d'erreur / Température extérieure	60
4.5. Comparaison dynamique puissance réelle / puissance modélisée	61
CONCLUSION	62
BIBLIOGRAPHIE.....	64
RESUMÉ	65
ABSTRACT.....	65
ANNEXE 1 : PONTS THERMIQUES.....	66
1. PRESENTATION.....	66
2. MODULE ACMB	66
2.1. Définition géométrique	66
2.2. Résultats THERM	66
3. MODULE KLH.....	67
3.1. Définition géométrique	67
3.2. Résultats THERM	68
4. MODULE ECOLOGGIA 1 ET 2	69
4.1. Définition géométrique	69

4.2. Résultats THERM	69
5. MODULE MADRIERS	70
5.1. Définition géométrique	70
5.2. Résultats THERM	71
ANNEXE 2: COMPARAISON DYNAMIQUE ENTRE PUISSANCE REELLE ET MODELISE.....	72
1. PRESENTATION	72
2. MODULE ACMB	72
3. MODULE ECOLOGGIA 1.....	72
4. MODULE ECOLOGGIA 2	73
5. MODULE KLH.....	73
6. MODULE MADRIER	74
ANNEXE 3 : REPARTITION DES DEPERDITIONS THERMIQUES.....	75

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : assemblage de la trame en bois	9
Figure 2 : Etape de finition (isolation, fermeture...)	9
Figure 3 : Pose d'un mur ossature bois sur chantier	9
Figure 4 : Composition d'un mur de panneau contrecollé	10
Figure 5 : Pose d'un mur de panneau contrecollé sur chantier	10
Figure 6 : Pose de l'étanchéité au niveau de la toiture	11
Figure 7 : Assemblage des différents murs	11
Figure 8 : Illustration des différents modes d'isolation possible avec le mur madrier.....	12
Figure 9 : Assemblage d'une liaison mur-mur en madriers	12
Figure 10 : Composition de la porte des modules	14
Figure 11 : Vue en coupe de la paroi du module ACMB	15
Figure 12 : Vue en coupe et composition de la paroi du module KLH.....	17
Figure 13 : Composition des parois des modules Ecologia 1 et 2.....	19
Figure 14 : Composition de la paroi du module Madrier	21
Figure 15 : modèle géométrique d'un angle	24
Figure 16 : modèle géométrique d'une liaison mur-sol	24
Figure 17 : conditions aux limites	25
Figure 18 : Dimensions raccord Mur-Toiture.....	26
Figure 19 : Dimensions raccord Mur-Mur	26
Figure 20 : Dimensions raccord Mur-Sol.....	26
Figure 21 : Modèle 2D d'un angle de paroi ACMB sans les montants d'ossature bois.....	27
Figure 22 : Traitement des parois à lame d'air fortement ventilée.....	29
Figure 23 : Illustration de la modélisation selon la norme	29
Figure 24 : Modélisation d'un raccord mur-mur en ossature bois	29
Figure 25 : Raccord mur-mur du module ACMB sans les montants d'ossature bois	30
Figure 26 : maillage d'éléments finis et température du raccord mur/sol du module ACMB	31
Figure 27 : flux thermique du raccord mur/sol du module ACMB	31
Figure 28 : Puissance instantanée mesurée.....	33
Figure 29 : Energie journalière estimée.....	34
Figure 30 : part horaire du rayonnement global	36
Figure 31 : répartition des rayonnements global mesuré et diffus estimé.....	36
Figure 32 : Feuille Excel pour déterminer le rayonnement diffus horaire	37
Figure 33 : répartition du diffus selon le modèle de Perrin de Brichambaut.....	39
Figure 34 : différences journalières des rayonnements diffus réel et estimé.....	40
Figure 35 : Rayonnements global mesuré, diffus mesuré et diffus estimé du 1 ^{er} au 7 janvier	40
Figure 36 : Rayonnements global mesuré, diffus mesuré et diffus estimé du 1 ^{er} au 7 août	40
Figure 37 : évolution de la consommation pour les besoins de chauffage par saison.....	41

Figure 38 : exemple de la feuille Excel en .csv	42
Figure 39 : Paramétrage de MeteoCalc	43
Figure 40 : armoire électrique	44
Figure 41 : schéma de mesure de la tension et de l'intensité	44
Figure 42 : Schéma de fonctionnement des différents logiciels entre eux	46
Figure 43 : Vue de dessus du module modélisé	46
Figure 44 : Vue 3D du module modélisé sous ALCYONE	46
Figure 45 : Ecran de sélection des différentes compositions.....	47
Figure 46 : Ecran de saisie des paramètres météorologiques et géographiques du bâtiment	47
.....	
Figure 47 : Ecran récapitulatif de la composition de la paroi du module ACMB sous PLEIADES	50
Figure 48 : Ecran de présentation des résultats sous COMFIE	51
Figure 49 : répartition des déperditions totales du module ACMB.....	53
Figure 50 : évolution de la répartition des flux au cours d'une année.....	54
Figure 51 : répartition moyenne des déperditions thermiques	55
Figure 52 : Ecran de présentation des résultats sous PLEIADES + COMFIE	55
Figure 53 : besoin de chauffage par module.....	56
Figure 54 : Puissance de chauffage nécessaire par module.....	56
Figure 55 : coefficients de transmission surfacique par module	56
Figure 56 : besoin de chauffage (kWh) et U paroi (W/m ² .K) pour chaque module.....	57
Figure 57 : illustration du déphasage et de l'amortissement dans les modules.....	58
Figure 58 : Comparaison de la température extérieure et du pourcentage d'erreur pour le module ecologia 1	60
Figure 59 : Comparaison de la température extérieure et du pourcentage d'erreur pour le module KLH.....	60
Figure 60 : Comparaison entre la puissance réelle et celle modélisée (besoin de chauffage)	61
.....	

TABLE DES TABLEAUX ET EQUATIONS

Tableau 1 : Composition du plancher et de la toiture des modules.....	14
Les caractéristiques physiques de chacun des matériaux sont résumées par le Tableau 2 :	
Tableau 2 : Caractéristiques physiques des matériaux du module ACMB	16
Tableau 3 : Valeurs des ponts thermiques pour le module ACMB	16
Tableau 4 : Tableau récapitulatif de la composition de la paroi du module KLH	17
Tableau 5 : Valeurs des ponts thermiques pour le module KLH	18
Tableau 6 : Description des matériaux utilisés dans le module ECOLOGGIA 1	20
Tableau 7 : Description des matériaux utilisés dans le module ECOLOGGIA 2	20
Tableau 8 : Valeurs des ponts thermiques pour le module ECOLOGGIA 1 et 2.....	21
Tableau 9 : Description des matériaux utilisés pour le module Madrier.....	22
Tableau 10 : Valeurs des ponts thermiques pour le module Madrier	22
Tableau 11 : Comparaison des lames d'air sous THERM.....	27
Tableau 12 : Résistances superficielles dans les parois.....	28
Tableau 13 : Valeurs du coefficient Ψ selon la modélisation choisie	30
Tableau 14 : Ponts thermiques calculés pour les différents modules	30
Tableau 15 : Comparaison sous Pléiade des cas réels et estimés	41
Tableau 16 : puissance dissipée par les armoires électriques	45
Tableau 17 : Modélisation en stationnaire du module ACMB.....	52
Tableau 18 : variation des flux thermiques du module ACMB.....	53
Tableau 19 : parts des flux thermiques annuels du module ACMB.....	53
Tableau 20 : Parts des besoins de chauffage annuels du module ACMB	54
Tableau 21 : Récapitulatif des besoins de chauffage (kWh) du 1 ^{er} décembre au 5 février .	59
Tableau 22 : Récapitulatif des besoins de chauffage (kWh) sur la semaine la plus chaude/la plus froide	59
Tableau 23 : Différence entre réalité et modélisation de la consommation de chauffage pour chaque module	62
Équation 1 : Corrélation de Collares-Pereira.....	33
Équation 2 : Rapport K_T	33
Équation 3 : Irradiation journalière G_0	33
Équations 4 : Passage de puissances instantanées à énergie journalière	34
Équation 5 : Déclinaison δ	35
Équation 6 : Module de l'angle horaire du lever du soleil.....	35

INTRODUCTION

Les préoccupations environnementales sont aujourd'hui au cœur des débats. Le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie en France. Depuis le sommet de Rio (1992) et l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto (2005) de nombreuses mesures ont été adoptées pour réduire la consommation en énergie et en matière première de ce secteur. Il en a découlé la mise en place de réglementations thermiques de plus en plus contraignantes, ou encore de labels de qualité environnementale ou de performance énergétique (HQE, BBC, maison passive).

Les systèmes constructifs bois ont de nombreux atouts pour répondre à ces nouvelles exigences. Les performances thermiques atteintes sont prometteuses et l'utilisation raisonnée du bois, alliée à une exploitation durable des forêts, en font une ressource renouvelable. Cependant le caractère hygroscopique du matériau bois rend les études sur le comportement de ces constructions complexes. Le projet TRANSBATIBOIS (TRANSferts dans les parois de BATiments en BOIS) s'inscrit dans cette problématique et propose une étude approfondie des transferts couplés de chaleur et de masse dans différents systèmes constructifs bois. Ce projet s'articule autour d'études à différentes échelles : matériau, paroi, modules expérimentaux et bâtiments en cours d'utilisation.

On remarque que de nos jours, les outils de simulation thermique sous-estiment l'efficacité thermique des bâtiments en bois, à une hauteur de 10 à 30 % selon la littérature. L'objectif du projet TRANSBATIBOIS est de proposer une modélisation thermique plus fine et plus juste des bâtiments en bois, les défavorisant moins.

L'objectif de notre Projet de Fin d'Etude s'inscrit dans le projet TRANSBATIBOIS. Notre étude doit confirmer qu'un outil de simulation thermique dynamique tel que PLEIADES présente bien une réelle sous-estimation de la résistance thermique globale du bâtiment et, le cas échéant, la quantifier. Pour cela, notre étude portera sur cinq modules expérimentaux qui ont été construits et instrumentés sur le site de l'ENSTIB à Epinal. Ces modules de 9 m² et aux compositions de parois bien définies sont en ossature bois, KLH et madriers. Ils seront modélisés le plus fidèlement possible sous Pléiades, et la consommation réelle de chauffage sera comparée avec la consommation théorique de la modélisation. L'objectif est de neutraliser ou de quantifier les paramètres parasites qui pourraient induire une erreur dans le résultat de la simulation.

Le projet suivra le plan suivant : on va commencer par décrire les modules ainsi que les différentes hypothèses retenues, puis la méthodologie utilisée pour le calcul des ponts thermiques et celle pour créer le fichier météo. On expliquera ensuite la modélisation sous Pléiades avant d'exploiter les résultats et de conclure.

Partie 1 : DESCRIPTION DES MODULES ET HYPOTHESES

1. MODE CONSTRUCTIF

1.1. Ossature bois

Les maisons ossature bois respectent la majeure partie du temps le principe constructif suivant :

Les murs sont fabriqués directement en usine. Une trame régulière de pièces verticales et horizontales en bois, (espacée de 40 ou 60 cm) est érigée (Figure 1), constituant le squelette ou ossature de la maison, à l'intérieur duquel sera introduit l'isolation. Cette trame est ensuite complétée par une série d'éléments de fermetures, d'isolation et de finition de l'ouvrage (Figure 2). Le rez-de-chaussée est monté sur une dalle de béton ou de bois.



Figure 1 : assemblage de la trame en bois

A l'extérieur sont cloués des panneaux de contreventement. Un film pare-pluie est ajouté, puis un revêtement extérieur (bardage bois, brique, pierre). A l'intérieur l'ossature est fermée par un film pare-vapeur, indispensable car l'humidité est l'ennemie du bois. Cette humidité provient de l'activité humaine à l'intérieur du bâtiment. L'habillage sera réalisé en bois ou parement type Fermacell. [7] [8] [9]



Figure 2 : Etape de finition (isolation, fermeture...)

Ses atouts :

- Ossature porteuse est constituée de sections de bois élancées, standardisées.
- Simplicité de l'approvisionnement en matériau de construction
- Assemblage par contact ou fixations mécaniques.
- Temps de chantier réduit (pose de mur entier (Figure 3)).
- Possibilités de différents degrés de finition.
- Ce système présente l'intérêt de pouvoir être préfabriqué en atelier.
- Structure légère qui permet d'être transportée facilement à moindre coût.
- Engendre des fondations de l'ouvrage moins onéreuses que la construction maçonnée.



Figure 3 : Pose d'un mur ossature bois sur chantier

- Souplesse de conception, elle permet des extensions, ajout et suppression de baies, de cloisons, sous réserve que toute intervention sur la structure soit rationnelle et bien étudiée.

Ses limites :

- faible inertie thermique, comparée avec une maison en bois massif. Ouvertures limitées à cause du maillage relativement étroit de la structure.
- Ponts thermiques à traiter avec beaucoup de rigueur pour atteindre des performances d'étanchéité à l'air compatibles avec la norme BBC. Les maisons « Passives » nécessitent une isolation renforcée.

De plus, une grande rigueur lors de la construction des murs et lors de la pose notamment au niveau des pare-vapeur et pare-pluie doit être observée.

1.2. Panneau contrecollé

La 1^{ère} étape de la construction est le coulage de la dalle béton ayant pour but d'assurer une bonne planéité et une stabilité de l'ensemble.

Les murs sont fabriqués en usine, aux dimensions exactes de la maison (avec les découpes des ouvertures). Ils sont composés de lames de bois massif, correspondant à 1 pli (environ 3 cm d'épaisseur), collées les unes aux autres. Chaque mur comprend un nombre impair de plis (3, 5, 7,9) et les plis sont croisés les uns par rapport aux autres (sens des lames alternés) comme l'illustre la Figure 4.



Figure 4 : Composition d'un mur de panneau contrecollé

Il existe plusieurs fabricants de ce type de panneaux (KLH, MHM, Leno, HMS...), dont la plupart sont situés en Allemagne car ces techniques sont assez fréquentes outre-Rhin. Mais il est possible de trouver des fournisseurs en France.



Figure 5 : Pose d'un mur de panneau contrecollé sur chantier

Ensuite on vient poser et fixer les murs au sol (à l'aide d'une grue) en les maintenant préalablement par des étais (cf. Figure 5 ci jointe). Les murs sont fixés au sol grâce à des équerres et goujons métalliques. Puis lorsque tous les murs sont posés, ils sont assemblés entre eux, le plus souvent par vis (Figure 7). On vient ensuite faire reposer les planchers sur ces murs. On fait de même pour les étages supérieurs.

Il reste ensuite à isoler par l'extérieur ainsi qu'à mettre hors d'eau la toiture (Figure 6). [7] [8] [9]



Figure 7 : Assemblage des différents murs



Figure 6 : Pose de l'étanchéité au niveau de la toiture

Ses atouts :

- Variations dimensionnelles très réduites et performances mécaniques très importantes, car les charges sont reprises dans tous les plans.
- Ces panneaux peuvent tout aussi bien être utilisés en murs qu'en planchers.
- L'étanchéité à l'air obtenue dans ce mode constructif, est une des plus performantes, car les panneaux monoblocs sont assemblés entre eux par des systèmes de fixation qui rendent étanche toute l'enveloppe, avant même la pose de l'isolation par l'extérieur.
- Les performances énergétiques sont adaptables par la nature et l'épaisseur de l'isolation, quelle que soit la région de construction.
- La norme BBC est largement réalisable et « la maison Passive » est une performance énergétique très adaptée à ce mode constructif.
- Le panneau Structurel est le seul mode constructif bois qui accepte la construction de bâtiments de grande hauteur (ex : R+9 en cours de réalisation actuellement en France).
- C'est un matériau qui présente un bilan carbone exceptionnel.

Ses limites :

- La préfabrication des panneaux en usine et leur poids nécessite des moyens de manutention lourds.
- Les qualités d'étanchéité et d'inertie permettent de rapidement compenser le léger surcoût de ce mode constructif.

1.3. Murs empilés

Dans la construction par empilage, les madriers assurent les fonctions statiques et la délimitation des espaces. Ils participent également au confort thermique et acoustique.

La définition des espaces, tant du point de vue formel que dimensionnel, est fortement contraint par la longueur des bois et les modes d'assemblage. La rigidité des constructions par empilage est assurée par l'ensemble des murs porteurs.

Elle repose sur le poids des éléments et les assemblages par entaille. La massivité du bois ainsi que ses caractéristiques thermo-hygrométriques permettent aux murs en madriers d'apporter une bonne réponse au confort thermique d'été. En région froide, afin d'améliorer l'isolation thermique, les murs en madriers peuvent être isolés de deux façons possibles (cf. Figure 8)



Figure 8 : Illustration des différents modes d'isolation possible avec le mur madrier



Un élément fondamental à prendre en compte dans ce mode de construction est le tassement, il faut considérer un tassement pouvant atteindre 25mm par étage. Cette déformation doit être prise en compte par des mesures constructives.

En atelier, les différentes poutres composant les murs sont usinés et entaillés aux dimensions voulues. Tous les éléments ainsi usinés sont ensuite envoyés sur le chantier et sont assemblés sur place. [7] [8] [9]

Figure 9 : Assemblage d'une liaison mur-mur en madriers

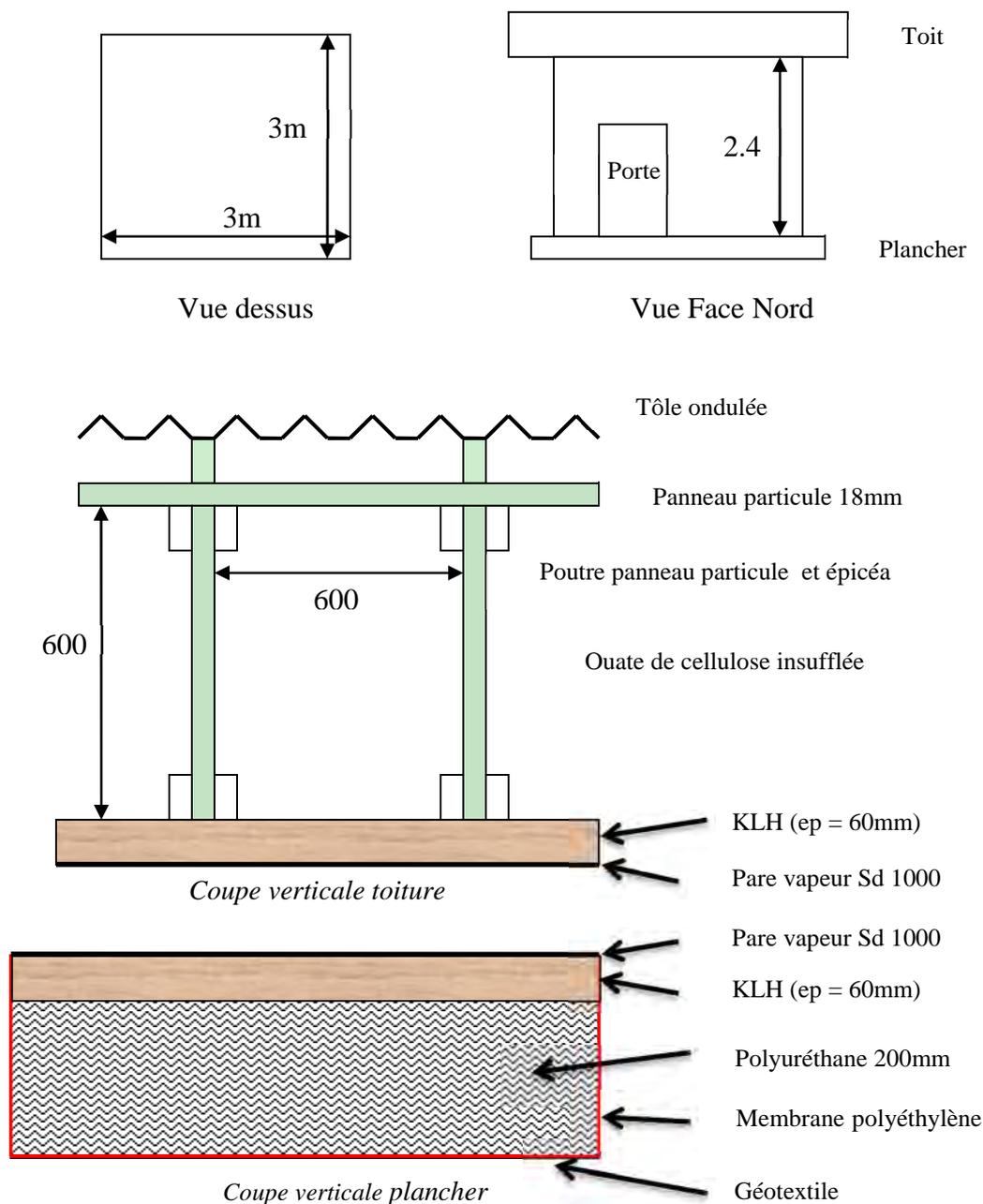
Ses atouts :

- Bonne isolation thermique due à la grande inertie du bois massif en forte épaisseur. Bonne hygrométrie car le bois joue un rôle de régulateur d'humidité.
- Le montage en kit de ce type de maisons est très bien adapté.
- Choix d'essence particulières
- Richesses des traitements d'angle

Ses limites :

- Tassement vertical inévitable, et qui influe sur les ouvertures (châssis, portes), les ponts thermiques et l'étanchéité de la maison à long terme.
- Niveau de savoir faire élevé
- Volumétrie stricte
- Consommation de bois importante
- Coût élevé

2. ELEMENTS COMMUNS AUX MODULES



Afin d'étudier les différences thermiques entre les différents modules, il est nécessaire que seule la composition des murs diffère entre chaque module. L'ensemble des parties autre que les parois verticales sont donc rigoureusement identiques entre chaque module (plancher, toiture principalement).

On retrouve dans le Tableau 1 suivant, le résumé de la composition du plancher et de la toiture :

Tableau 1 : Composition du plancher et de la toiture des modules

Type	Composition	Nom	Origine données	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique λ [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Coefficient μ [-]
Toiture							
Tôle ondulée							
panneau de particule		Panneau de particule bois	pleiades	800	0,15	2093	
Poutre en I		Panneau de particule bois + épicea					
isolant		Ouate insufflation	Nr gaia (ATE)	55	0,043	1400	59
plancher	Epicea	KLH	PLEIADES	450	0,13	2750	
Pare-vapeur	Sd 1000						
Sol							
Pare-vapeur	Sd 1000						
3 plis	Epicea	KLH	PLEIADES	450	0,13	2750	
isolant sol		Polyuréthane TMS	Doc EFISOL-2005	30	0,025	1500	
Membrane polyéthylène							
Géotextile							

La porte est également une partie commune à tous les modules. Cette porte est constituée d'un panneau de particules (18 mm), d'une mousse isolante (80 mm) et de mousse polyuréthane afin de minimiser au mieux les pertes thermiques. De plus sur les contours de la porte, 12 cm de mousse isolante ont été installés.

On retrouve ci-dessous un schéma représentatif (Figure 10) de la composition de cette porte :

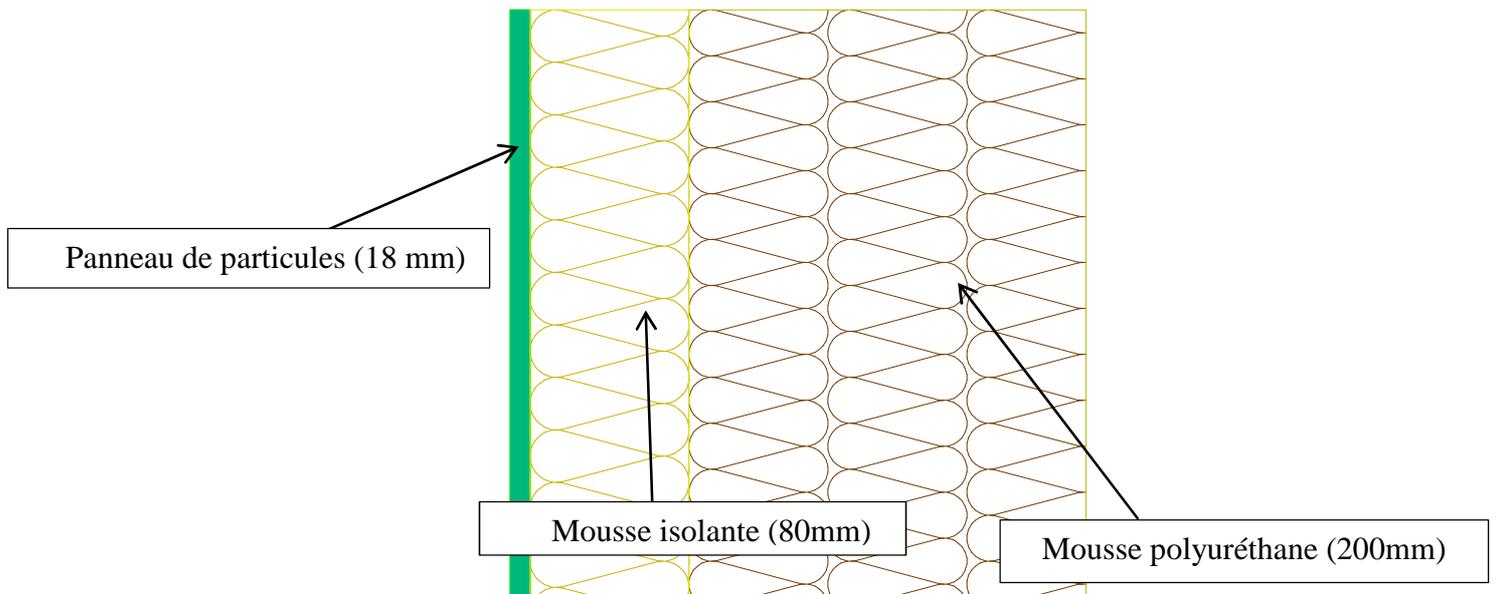


Figure 10 : Composition de la porte des modules

3. LE MODULE ACMB

3.1. Description

Le module ACMB a été réalisé par la société **Atelier Construction Maison Bois**. Il respecte les dimensions ainsi que les compositions du plafond et du sol définies plus haut pour les cinq modules installés sur le campus fibre. La paroi est une ossature de 600 mm d'entraxe avec des montants de 45 mm par 200 mm. L'isolation entre montant est assurée par de la laine de bois basse densité. Un panneau de fibre de bois dense joue le rôle de pare pluie et de support du bardage. Le contreventement est assuré par des panneaux MFP et le revêtement intérieur est en plaque de Fermacell. (cf. Figure 11)

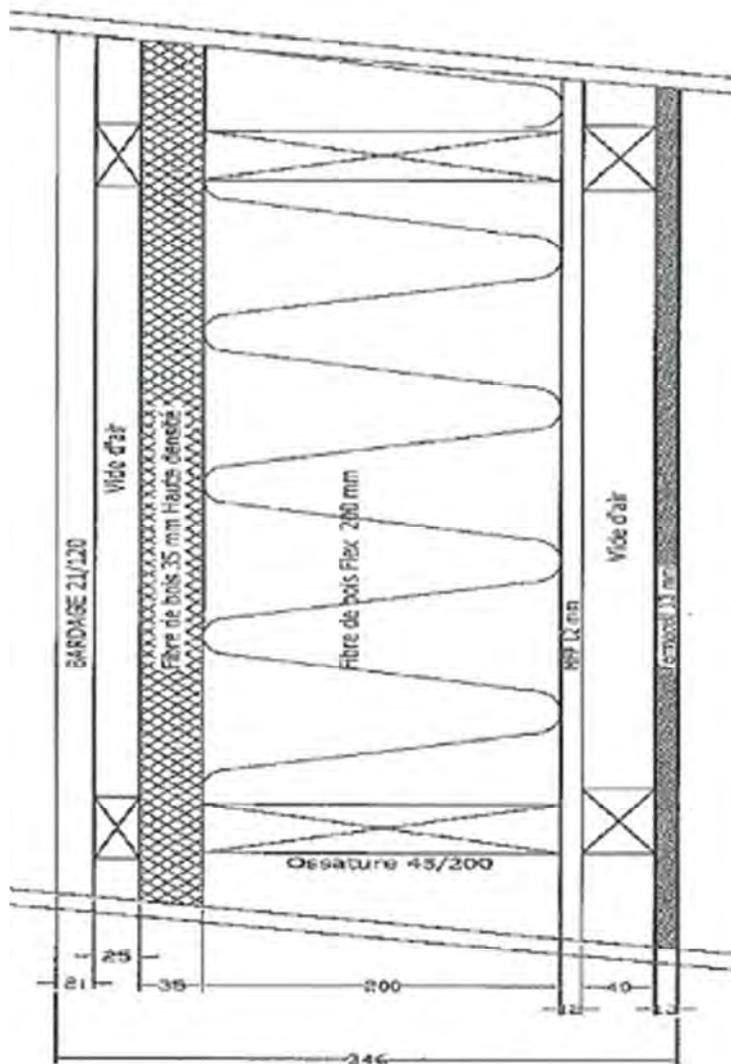


Figure 11 : Vue en coupe de la paroi du module ACMB

Les caractéristiques physiques de chacun des matériaux sont résumées par le Tableau 2 :
Tableau 2 : Caractéristiques physiques des matériaux du module ACMB

Type	Composition	Nom	Origine données	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique λ [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Coefficient μ [-]
Mur							
Bardage	Mélèze	Bardage mélèze	Fiche technique	600	0,14	2400	
Tasseau		Epicea	PLEIADES	450	0,13	2750	
Panneaux isolants	fibres de bois HD	Homatherm UD Standard	Fiche technique	270	0,046	2100	9
Isolants souples	fibres de bois	SYLVACTIS 55FX	Fiche technique	50	0,036	2000	<2
Montant		Epicea	PLEIADES	450	0,13	2750	
contreventement		MFP	Fiche technique	690	0,13	2000	50 humide 100 sèche
Tasseau		Epicea	PLEIADES	450	0,13	2750	
Revêtement intérieur		Fermacell	Fiche technique	1150	0,32	1623	13

3.2. Hypothèses avancées

D'après la modélisation des ponts thermiques sous le logiciel THERM (cf. Partie 2 :), nous obtenons les valeurs présentées dans le Tableau 3 pour le module ACMB :

Tableau 3 : Valeurs des ponts thermiques pour le module ACMB

Module ACMB	Ponts thermiques (W/m.K)
Liaison Mur-Mur (angle sortant)	0,056
Liaison Mur-Plancher	0,179
Liaison Mur-Toiture	0,056

4. LE MODULE KLH

4.1. Description

Le module KLH reprend les compositions de sol et de toiture communes. La paroi présentée dans la Figure 12 se compose d'un panneau de bois massif contrecollé (de marque KLH) de 94 mm d'épaisseur jouant le rôle de structure porteuse, de revêtement intérieur et de régulateur de vapeur, viennent ensuite 120mm d'isolant en fibre de bois et un panneau en fibre de bois plus dense de 60mm d'épaisseur. Le revêtement extérieur est un crépi trois couches de type FEMA.

Ci-dessous, on retrouve le Tableau 4 récapitulatif de tous les matériaux composants la paroi du module KLH :

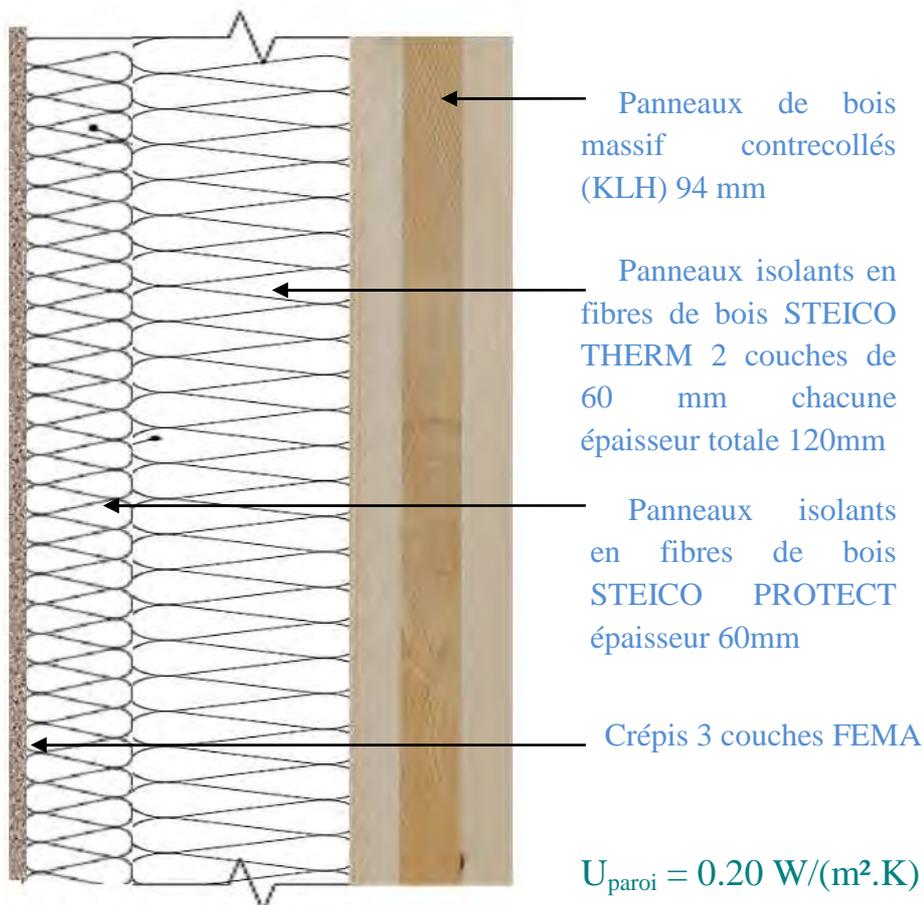


Figure 12 : Vue en coupe et composition de la paroi du module KLH

Tableau 4 : Tableau récapitulatif de la composition de la paroi du module KLH

MODULE KLH							
Type	Composition	Nom	Origine données	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique λ [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Coefficient μ [-]
Mur							
Crépis	3 couches	FEMA	Fiche technique	1400			
Montant	Epicea		PLEIADES	450	0,13	2750	
Panneaux isolants	Fibre de bois	STEICO THERM	Fiche technique	160	0,039	2100	5
	Fibre de bois	STEICO PROTECT Type	Fiche technique	265	0,048	2100	5
3 plis	Epicéa	KLH	Fiche technique	500	0,13	2200	

4.2. Hypothèses avancées :

D'après la modélisation des ponts thermiques sous le logiciel THERM (cf. Partie 2 :), nous obtenons les valeurs présentées dans le Tableau 5 pour le module KLH :

Tableau 5 : Valeurs des ponts thermiques pour le module KLH

Module KLH	Ponts thermiques (W/m.K)
Liaison Mur-Mur (angle sortant)	0,039
Liaison Mur-Plancher	0,168
Liaison Mur-Toiture	0,038

5. LES MODULES ECOLOGGIA 1 & 2

5.1. Description

Les modules ECOLOGGIA 1 & 2 ont été réalisés par la société **ECOLOGGIA**. Les modules respectent les dimensions ainsi que les compositions du plafond et du sol définies en I.2. La paroi est une ossature de 600 mm d'entraxe avec des montants de 45 mm par 145 mm. Néanmoins les 2 modules ne sont pas tout à fait identiques. Les différences entre ces modules sont illustrées par la Figure 13.

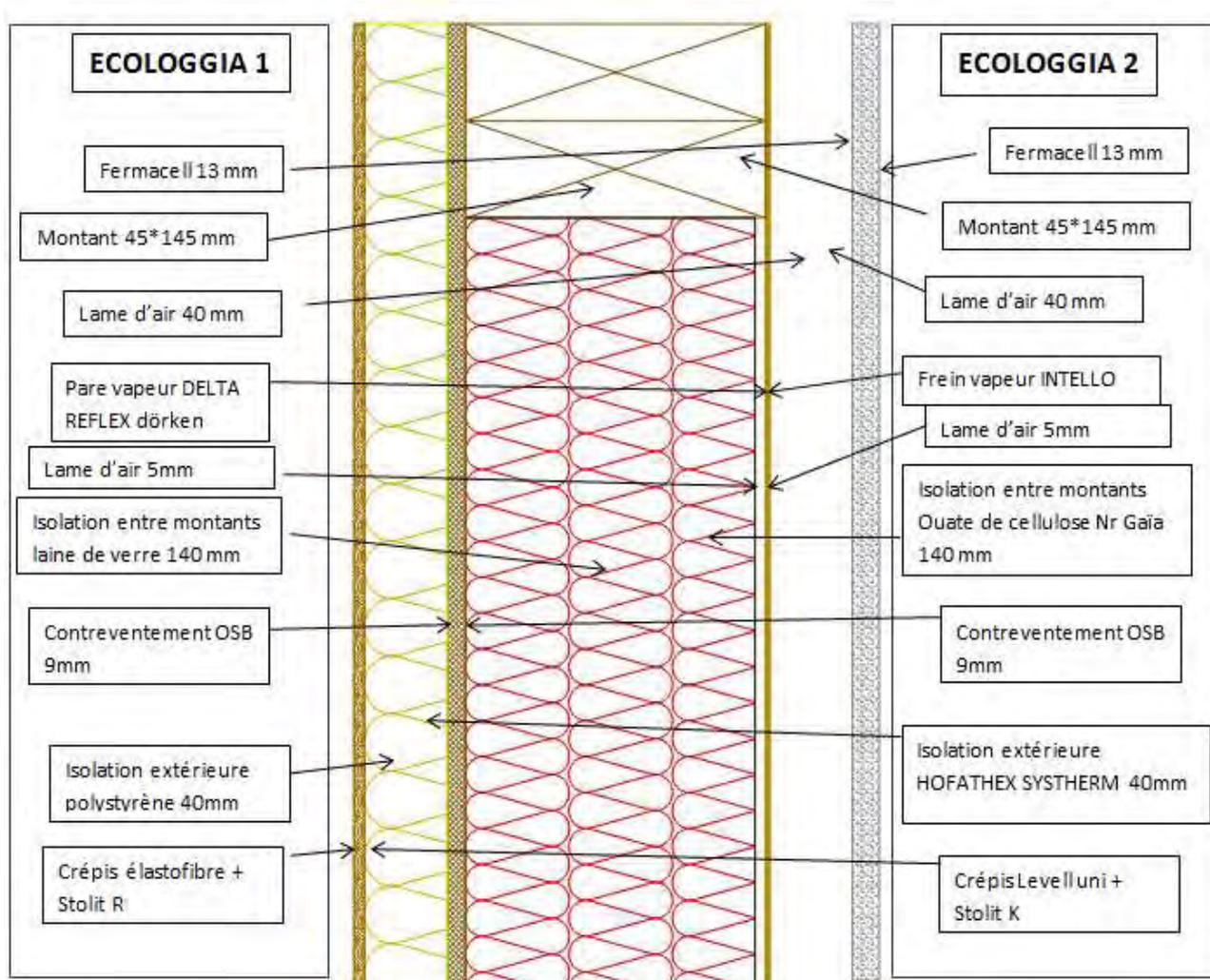


Figure 13 : Composition des parois des modules Ecologia 1 et 2

Les caractéristiques thermiques des composants des deux modules sont résumées dans les tableaux suivants (Tableau 6, Tableau 7) :

Tableau 6 : Description des matériaux utilisés dans le module ECOLOGGIA 1

MODULE ECOLOGGIA 1							
Type	Composition	Nom	Origine données	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique λ [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Coefficient μ [-]
Mur							
revêtement extérieur	crépis élastofibre + Stolit R	STO	Fiche technique	1700	0,7	1400	150
isolant extérieur	Polystyrène	STO	Fiche technique	15	0,038	1500	35
contreventement	OSB	Kronoply	Fiche technique	630	0,13	1700	169
Isolants souples	Laine de verre		Fiche technique	12	0,035	1030	1,2
Montant		Epicea	PLEIADES	450	0,12	2400	
Pare-vapeur		DELTA REFLEX Dörken	Fiche technique	180 g/m ²			100
Tasseau		Epicea	PLEIADES	450	0,13	2750	
Revêtement intérieur		Fermacell	Fiche technique	1150	0,32	1623	13

Tableau 7 : Description des matériaux utilisés dans le module ECOLOGGIA 2

MODULE ECOLOGGIA 2							
Type	Composition	Nom	Origine données	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique λ [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Coefficient μ [-]
Mur							
revêtement extérieur	crépis Levelluni + Stolit K	STO	Fiche technique	1300	0,87	1400	25
isolant extérieur	Hofatex system		Fiche technique	210	0,044	2100	5
contreventement	OSB	Kronoply	Fiche technique	630	0,13	1700	169
Isolants souples	Ouate de cellulose	Nr Gaïa	Fiche technique pléiade	55	0,045	1400	59
Montant		Epicea	PLEIADES	450	0,12	2400	
Pare-vapeur		Frein vapeur INTELLO	Fiche technique	100 g/m ²			
Tasseau		Epicea	PLEIADES	450	0,13	2750	
Revêtement intérieur		Fermacell	Fiche technique	1150	0,32	1623	13

5.2. Hypothèses avancées :

D'après la modélisation des ponts thermiques sous le logiciel THERM (cf. Partie 2 :), nous obtenons les valeurs présentées dans le Tableau 8 pour les modules ECOLOGGIA :

Tableau 8 : Valeurs des ponts thermiques pour le module ECOLOGGIA 1 et 2

Ponts thermiques (W/m.K)	Ecologgia 1	Ecologgia 2
Liaison Mur-Mur (angle sortant)	0,055	0,056
Liaison Mur-Plancher	0,186	0,186
Liaison Mur-Toiture	0,049	0,048

6. LE MODULE MADRIER

6.1. Description

Ce module a été réalisé par la société Poirot Construction. Ce module madrier reprend les dimensions ainsi que les compositions du plafond et du sol communes. La paroi présentée dans la Figure 14 se compose de madriers d'épaisseur 70mm jouant le rôle de structure porteuse, de revêtement intérieur et de régulateur de vapeur, puis viennent 60mm d'isolant en fibre de bois entre montant de 45*60 mm et une seconde isolation fibre de bois de 120mm entre montant de 45*120 mm ainsi qu'un frein-vapeur vario KM Duplex (cf. Figure 14).

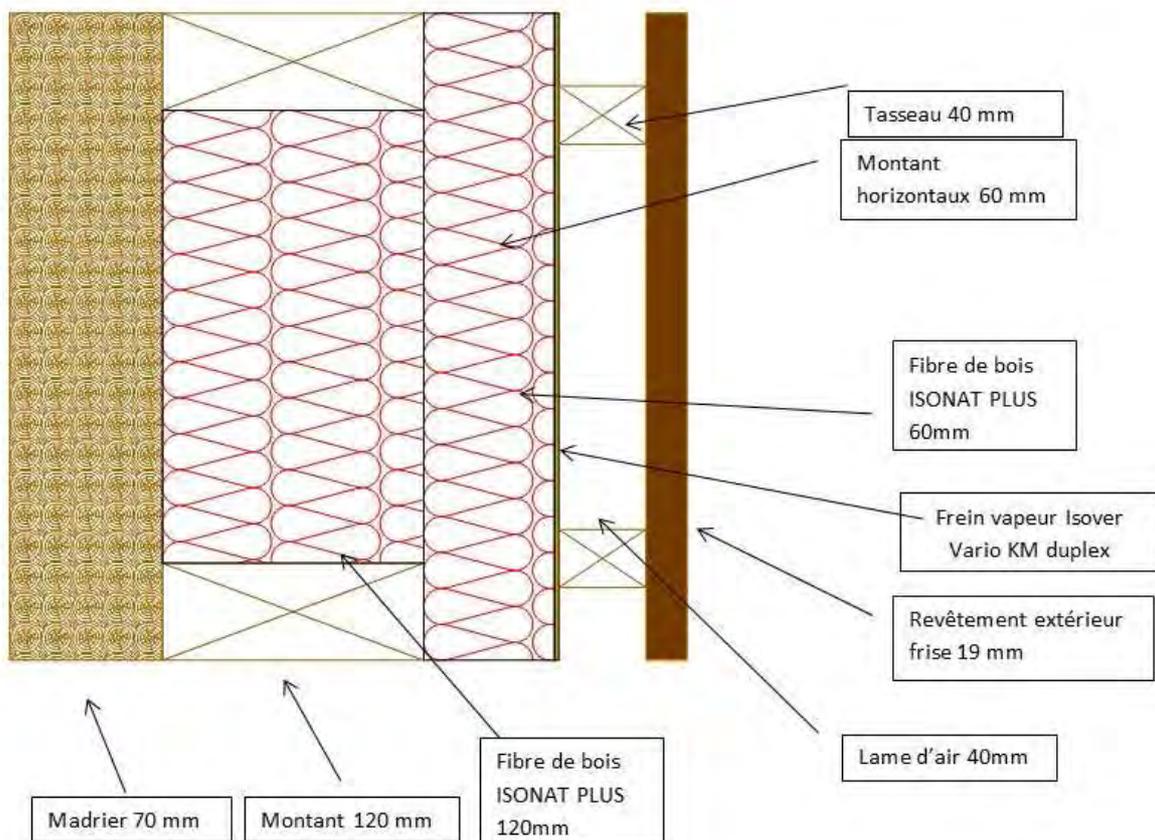


Figure 14 : Composition de la paroi du module Madrier

Les caractéristiques thermiques des composants du module sont résumées dans le Tableau 9

Tableau 9 : Description des matériaux utilisés pour le module Madrier

MODULE MADRIER Poirot Construction							
Type	Composition	Nom	Origine données	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique λ [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Coefficient μ [-]
Mur							
Madrier		Epicea	PLEIADES	450	0,12	2400	
Isolant 1	Fibre de bois	ISONAT PLUS	Fiche technique	55	0,038	2100	66
Montant		Epicea	PLEIADES	450	0,12	2400	
Isolant 2	Fibre de bois	ISONAT PLUS	Fiche technique	55	0,038	2100	66
Montant		Epicea	PLEIADES	450	0,12	2400	
frein-vapeur		ISOVER vario KM duplex	Fiche technique	80 g/m ²			
Tasseau		Epicea	PLEIADES	450	0,12	2400	
Revêtement intérieur	frise de revêtement	Epicea	PLEIADES	450	0,12	2400	

6.2. Hypothèses avancées :

D'après la modélisation des ponts thermiques sous le logiciel THERM (cf. Partie 2 :), nous obtenons les valeurs suivantes présentées dans le Tableau 10 pour le module Madrier :

Tableau 10 : Valeurs des ponts thermiques pour le module Madrier

Module Madrier	Ponts thermiques (W/m.K)
Liaison Mur-Mur (angle sortant)	0,042
Liaison Mur-Plancher	0,173
Liaison Mur-Toiture	0,049

Partie 2 : DETERMINATION DES PONTS

THERMIQUES :

1. DESCRIPTION GENERALE :

La modélisation des modules sous Pléiades nécessite l'entrée des ponts thermiques linéaires. Un pont thermique est défini dans les règles TH-U comme une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique, par ailleurs uniforme, est modifiée de façon sensible par une différence entre les surfaces intérieure et extérieure. On trouve ainsi des ponts thermiques linéaires à chaque liaison d'angle de parois. Les déperditions à travers les ponts thermiques linéaires se calculent en pondérant les coefficients linéaires (W/m.K) par leurs linéaires correspondants déterminés à partir des dimensions intérieures des locaux.[4]

Pour réaliser une modélisation des modules la plus fidèle possible à la réalité, il n'était pas conseillé de prendre les valeurs par défaut de Pléiades mais plutôt de modéliser les raccords d'angle sous un logiciel pour obtenir les vraies déperditions linéaires.

Les normes NF EN ISO 10211-1 et -2 : *Ponts thermiques dans les bâtiments – Calcul des flux thermiques et des températures superficielles* – donnent la méthode normalisée de détermination des ponts thermiques linéaires Ψ . [5] [6]

Le calcul d'un pont thermique conformément aux normes européennes nécessite l'utilisation de méthodes à résolution numérique comme les méthodes aux éléments finis. Pour cela, le logiciel THERM a été utilisé.

2. DESCRIPTION DU LOGICIEL THERM :

Ce logiciel de licence libre en anglais a été développé en Californie, au Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), pour une utilisation dans le domaine de la construction. THERM permet la modélisation de transferts de chaleur en deux dimensions, et l'évaluation de l'efficacité énergétique d'un système constructif.

L'analyse des transferts de chaleur par conduction 2D est basée sur un modèle éléments finis, qui permet la modélisation de géométries compliquées. [11]

3. PROCEDURE DE CALCUL SUIVANT LA NORME NF EN ISO 10211 :

3.1. Principe

La répartition de la température dans une construction et le flux thermique qui la traverse peuvent être calculés si les conditions aux limites et les détails de construction sont connus. A cet effet, le modèle géométrique est divisé en un certain nombre de cellules de matériau adjacentes, chacune ayant une conductivité thermique homogène.

Le pont thermique est calculé en régime stationnaire, et les propriétés physiques des matériaux sont indépendantes de la température et de l'humidité.

3.2. Modélisation de la géométrie :

La modélisation du bâtiment dans son intégralité par un seul modèle est une opération lourde et coûteuse d'où l'idée de le diviser en plusieurs parties à l'aide de plans de coupe appropriés de telle manière qu'aucune différence n'existe entre le résultat du calcul sur les parties séparées du bâtiment et le bâtiment traité dans son ensemble.

Le modèle géométrique doit comprendre, en plus du pont thermique, son environnement proche comme les parties de parois. Les spécifications minimums définies par la norme sont détaillées dans la Figure 15.

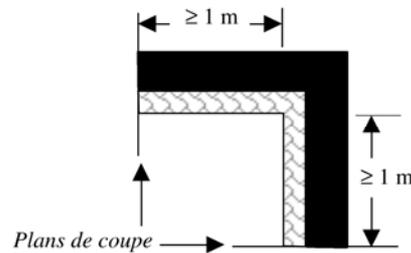


Figure 15 : modèle géométrique d'un angle

Pour le sol, le modèle géométrique à prendre en compte est celui défini sur la Figure 16, en mettant une condition adiabatique à la limite basse du sol, où b est la largeur du bâtiment.

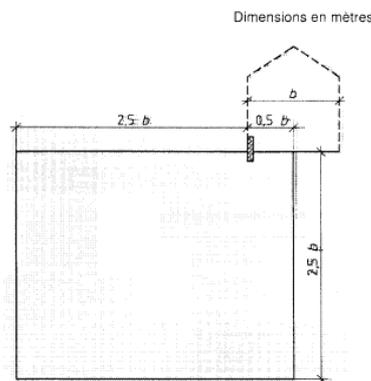


Figure 16 : modèle géométrique d'une liaison mur-sol

3.3. Caractéristiques thermiques des matériaux

Cette étape consiste à attribuer des caractéristiques thermiques de matériaux à des ensembles d'éléments du modèle. Ces caractéristiques sont obtenues d'après les fiches techniques des matériaux composant les modules.

3.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont de trois types :

- Conditions aux limites de température
- Conditions aux limites de flux
- Conditions aux limites d'ambiance

Généralement les conditions aux limites les plus utilisées pour le calcul des ponts thermiques sont de type b et c et consistent à imposer une condition adiabatique (flux de chaleur nul) aux plans de coupe, et des températures d'ambiances T_i , T_e avec des résistances superficielles R_{si} , R_{se} sur les surfaces exposées aux ambiances, chaude et froide (Figure 17).

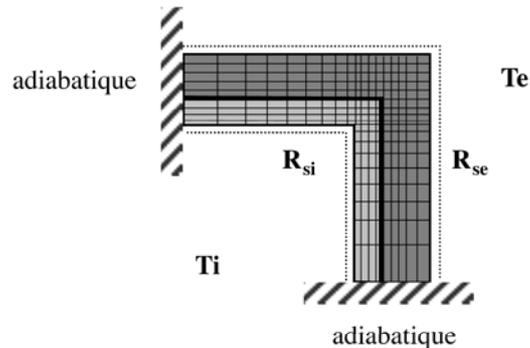


Figure 17 : conditions aux limites

3.5. Calcul numérique et exploitation des résultats :

Une fois les étapes précédentes accomplies, le calcul numérique peut être déclenché. Le résultat est le flux de chaleur global relatif au modèle composé du pont thermique et des parois voisines délimitées par les plans de coupe.

Le principe de calcul d'un pont thermique donné consiste à calculer le flux thermique qui lui est associé comme étant la différence entre le flux total obtenu par calcul numérique, et la somme des flux associés aux autres composants du modèle obtenus soit par calcul numérique, soit par calcul manuel.

$$\Psi = \text{[Image of a 2D model with a rainbow color gradient]} - \text{[Image of a 2D model with a rainbow color gradient]}$$

Le coefficient du pont thermique s'obtient en divisant le flux ainsi obtenu, par la différence de température entre les deux ambiances chaude et froide.

$$\Psi = \frac{\Phi_T}{\Delta T} - \sum_{i=1}^N U_i \cdot L_i$$

Où :

- Ψ est le coefficient linéique du pont thermique exprimé en $W/(m.K)$.
- Φ_T le flux total par mètre de longueur à travers le modèle 2D, exprimé en W/m .
- ΔT est la différence de température entre les deux ambiances chaude et froide, exprimé en K .
- U_i est le coefficient surfacique du composant i , exprimé en $W/(m^2.K)$.
- L_i est la longueur intérieure sur laquelle s'applique la valeur U_i dans le modèle géométrique 2D, exprimée en m .
- N est le nombre des composants 1D.

4. DONNEES POUR LE CALCUL DES PONTS THERMIQUES :

4.1. Modélisation

Les dimensions générales prises en compte sont : (Figure 19, Figure 18, Figure 20)

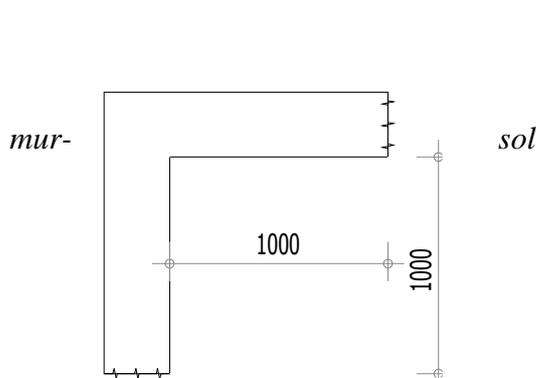


Figure 19 : Dimensions raccord
Mur-Mur

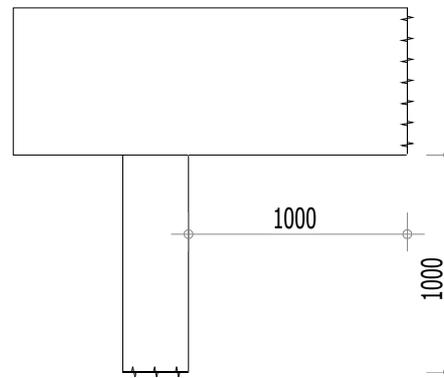


Figure 18 : Dimensions
raccord Mur-Toiture

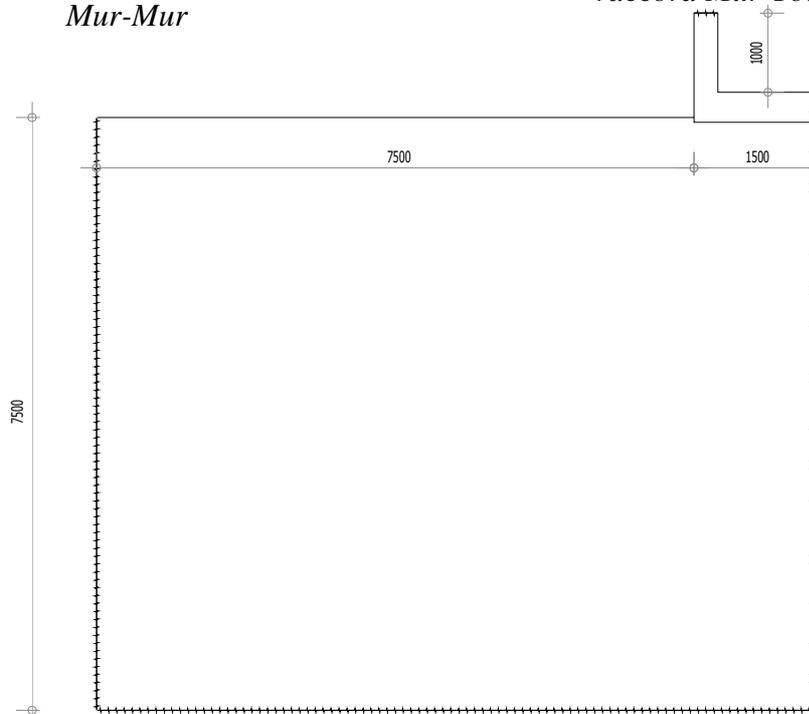


Figure 20 : Dimensions raccord Mur-Sol

4.2. Caractéristiques thermiques des matériaux

4.2.1. Lames d'air

Le logiciel THERM permet la modélisation de lames d'air ventilées ou non suivant plusieurs méthodes : NFRC et ISO 15099 pour les lames d'air non ventilées. Les règles TH-U donnent une méthode d'approximation des lames d'air minces non ventilées avec une résistance thermique surfacique équivalente R_g .

Une comparaison des méthodes proposées par THERM avec celle proposée par les règles TH-U a été effectuée pour valider les résultats de THERM.

Paroi étudiée : Modèle 2D d'un angle de paroi ACMB sans les montants d'ossature bois (Figure 21).

Lame d'air non ventilée derrière le Fermacell d'épaisseur $e = 40$ mm.

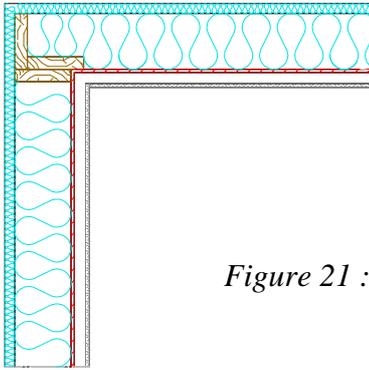


Figure 21 : Modèle 2D d'un angle de paroi ACMB sans les montants d'ossature bois

Calcul de R_g , Résistance thermique équivalente de la lame d'air non ventilée selon les règles TH-U [4] :

$$R_g = \frac{1}{ha + hr} = 0,169 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

avec $ha = \max\left(1,25; \frac{0,025}{e}\right) = 1,25$
 $e =$ épaisseur de la lame d'air en m.

$$hr = E \cdot h_{r0} = 4,67$$

$$h_{r0} = 5,7 \text{ (pour une température moyenne des surfaces environnantes de } 20^\circ\text{C)}$$

$$E = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9$$

Le résultat de la comparaison sur THERM des différents modèles de lame d'air, tous autres paramètres identiques est présenté Tableau 11:

Tableau 11 : Comparaison des lames d'air sous THERM

Modèle lame d'air	Coefficient U ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
ISO 15099	0,1811
NFRC	0,1746
Lame d'air TH-U avec $R_g = 0,169 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$	0,1751

On remarque que les différents modèles de THERM ne donnent pas les mêmes résultats. La méthode NFRC est la plus proche du résultat des règles TH-U. De plus, on remarque que la différence entre le modèle NFRC et les règles TH-U est de l'ordre de 0,3 %, soit négligeable. Ainsi, pour toutes les modélisations des lames d'air dans les modules, on retiendra le modèle NFRC de THERM.

4.2.2. Caractéristiques thermiques des matériaux

Le logiciel demande l'entrée, pour chaque matériau, de sa conductivité thermique et de son émissivité. Ainsi, les conductivités ont été extraites des fiches matériaux des composants des modules, mais l'émissivité n'est pas une donnée aussi facile à se procurer. Ainsi, elle a été fixée par défaut à 0,9 pour tous les matériaux.

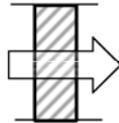
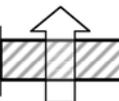
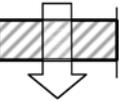
La conductivité thermique du sol a été fixée à $\lambda=2,0$ W/m.K.[4]

4.3. Conditions aux limites

4.3.1. Conditions de flux

Les résistances superficielles intérieures et extérieures R_{si} et R_{se} sont celles des règles TH-U. Elles sont présentées dans le Tableau 12:

Tableau 12 : Résistances superficielles dans les parois

Paroi donnant sur : – l'extérieur – un passage ouvert – un local ouvert ⁽²⁾	R_{si} m ² .K/W	$R_{se}^{(1)}$ m ² .K/W	$R_{si} + R_{se}$ m ² .K/W
Paroi verticale Flux horizontal 	0.13	0.04	0.17
Flux ascendant 	0.10	0.04	0.14
Paroi Horizontale Flux descendant 	0.17	0.04	0.21

(1) Si la paroi donne sur un volume non chauffé, R_{si} s'applique des deux côtés

(2) Un local est dit ouvert si le rapport de la surface totale des ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à 0.005 m²/m³. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.

Dans le cas d'une paroi possédant un bardage ventilé sur la face extérieure, on ne modélisera pas la lame d'air ainsi que le bardage et R_{se} sera pris égal à R_{si} (Figure 22) [4]

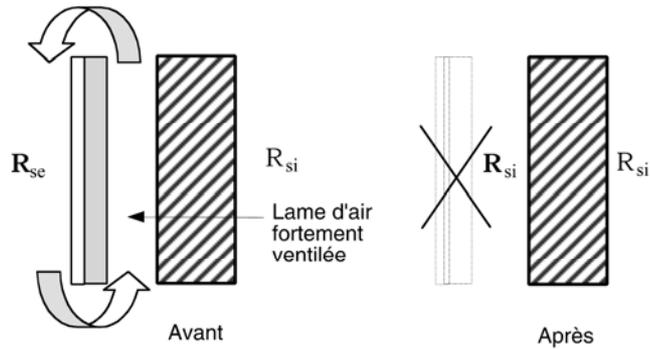


Figure 2 – Traitement des parois à lame d'air fortement ventilée

Figure 22 : Traitement des parois à lame d'air fortement ventilée

Les données à rentrer dans THERM sont les coefficients h_e et h_i , qui valent : $h = 1/R_s$.

4.3.2. Conditions d'ambiance

La température intérieure est définie dans la norme NF EN ISO 10211-1 comme la température sèche et la température extérieure comme la température de l'air supposant que le ciel soit complètement couvert.

Pour nos modélisations, nous avons pris : $T_i = 20^\circ\text{C}$ et $T_e = 0^\circ\text{C}$.

4.3.3. Modélisation des murs ossature bois

La norme nous impose de modéliser les murs sur une longueur au moins supérieure à 1 m de chaque côté de l'angle comme l'illustre la Figure 23. [5]

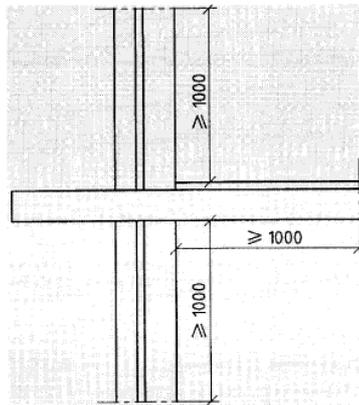


Figure 23 : Illustration de la modélisation selon la norme

Dans le cas d'un mur ossature bois, de part la disposition des montants dans l'angle, les deux murs d'un mètre de longueur se retrouvent être différents (Figure 24).

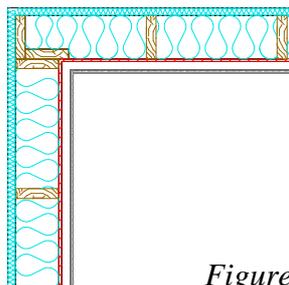


Figure 24 : Modélisation d'un raccord mur-mur en ossature bois

Ainsi, il a été réalisé une simulation de détermination du pont thermique linéique sur le module ACMB avec des montants dans les murs (Figure 24) et sans montants (cf. Figure 25), pour évaluer l'influence de ceux-ci sur le résultat total du pont thermique linéique.

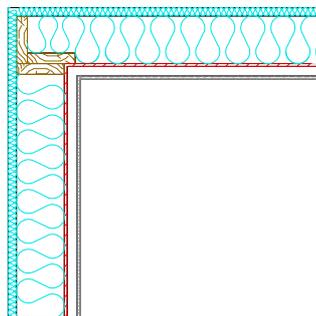


Figure 25 : Raccord mur-mur du module ACMB sans les montants d'ossature bois

Les résultats sont présentés dans le Tableau 13 :

Tableau 13 : Valeurs du coefficient Ψ selon la modélisation choisie

Modèle modélisation	Coefficient Ψ (W/m.K)
A : avec montants	0,071
B : sans montants	0,068

Ainsi, on obtient une différence de l'ordre de 3,1 % alors que l'erreur induite par le modèle éléments finis est de 2,8 % (résultat donné par THERM). Donc, on en déduit que le fait de modéliser ou non les montants courants dans les murs n'a pas d'influence pour la détermination du pont thermique linéique. Donc, les modélisations seront réalisées sans les montants dans les parties courantes pour simplifier les modèles.

5. RESULTATS :

Les résultats des différentes modélisations des ponts thermiques sous THERM sont présentés dans le Tableau 14

Tableau 14 : Ponts thermiques calculés pour les différents modules

	Coefficient de transmission surfacique U	Erreur de modélisation éléments finis	Longueur L intérieure	Coefficient de transmission linéique Ψ
	W/m ² .K	%	m	W/m.K
Toiture	0,0635	0,00	1,000	
sol	0,0000	0,00	1,000	
mur ACMB	0,1466	0,00	1,000	
angle	0,1746	1,96	2,000	0,056
liaison toiture	0,1358	2,20	1,962	0,056
liaison sol	0,1505	2,09	2,162	0,179

mur KLH	0,1910	0,00	1,000	
angle	0,2103	2,94	2,000	0,039
liaison toiture	0,1462	2,61	2,000	0,038
liaison sol	0,1618	3,00	2,216	0,168
mur Ecologgia 1	0,1997	0,00	1,000	
angle	0,2271	2,31	2,000	0,055
liaison toiture	0,1560	2,55	2,000	0,049
liaison sol	0,1692	2,30	2,249	0,181
mur Ecologgia 2	0,2083	0,00	1,000	
angle	0,2361	2,25	2,000	0,056
liaison toiture	0,1601	2,52	2,000	0,048
liaison sol	0,1729	2,29	2,249	0,181
mur madriers	0,1713	0,00	1,000	
angle	0,1925	2,91	2,000	0,042
liaison toiture	0,1368	2,70	2,000	0,039
liaison sol	0,1528	1,93	2,251	0,173

L'ensemble des définitions géométriques des liaisons modélisées ainsi que les résultats graphiques des ponts thermiques sont présentés en ANNEXE 1 : Ponts thermiques

Sur les Figure 26 et Figure 27 sont présentés les résultats graphiques pour la liaison mur/sol du module ACMB.

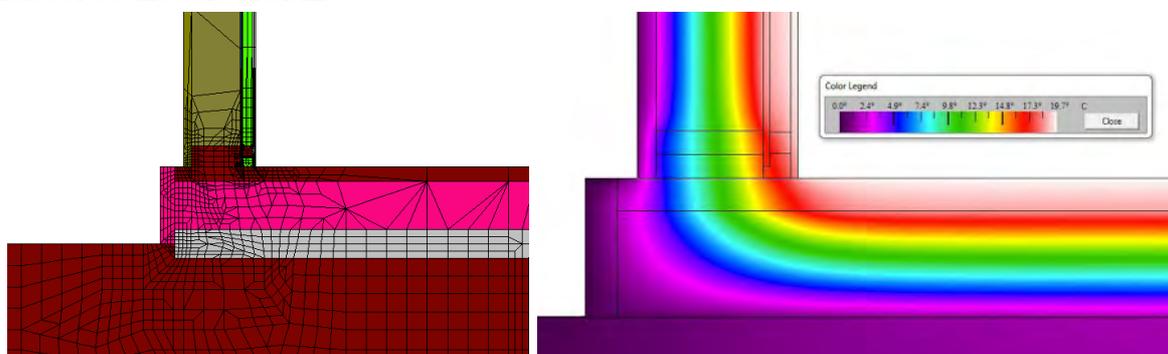


Figure 26 : maillage d'éléments finis et température du raccord mur/sol du module ACMB

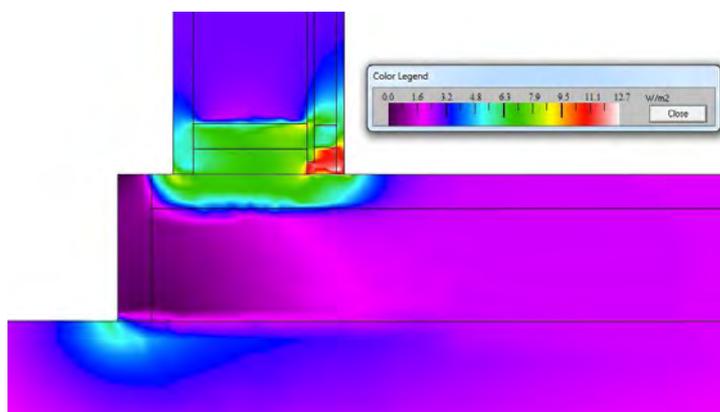


Figure 27 : flux thermique du raccord mur/sol du module ACMB

Partie 3 : FICHER METEO

1. INTRODUCTION

Pour modéliser le plus fidèlement possible les échanges thermiques entre les modules et l'extérieur, il fallait créer un fichier météo retranscrivant fidèlement les conditions climatiques réelles pour le logiciel Pléiades. Une station météo est présente sur le site de l'ENSTIB et permet de collecter des données comme la température, le rayonnement global, la pluviométrie, la vitesse du vent, l'humidité... Cette station météo récolte des données tous les quarts d'heure et les stocke sur un serveur présent dans les locaux de l'ENSTIB. Le logiciel Pléiades nécessite en entrée un fichier météo avec un pas horaire comprenant au minimum les informations suivantes : heure, date, température extérieure, rayonnement global et rayonnement diffus. Le problème majeur rencontré pour la création de ce fichier météo est que la station météo ne mesure pas le rayonnement diffus, ni le taux d'ensoleillement. Et comme cette donnée est essentielle, il a fallu se référer à la littérature pour pouvoir l'estimer.

2. ESTIMATION DU RAYONNEMENT DIFFUS

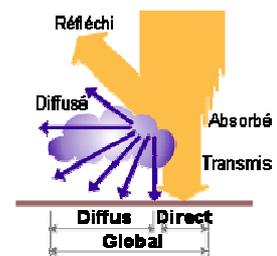
Yves Jannot, un ingénieur de recherche du CNRS au laboratoire LEMTA de Vandoeuvre lès Nancy, a écrit un cours sur le Thermique Solaire. Ce cours donne une méthode d'estimation du rayonnement diffus en fonction du rayonnement global. [1]

2.1. Généralités sur le rayonnement solaire :

Le soleil est une sphère gazeuse produisant une énergie de $3,6.10^{23}$ kW grâce à des réactions thermonucléaires. La terre reçoit quant à elle $1,8.10^{14}$ kW de cette énergie. Au dessus de l'atmosphère, le flux du rayonnement solaire moyen annuel reçu par une surface perpendiculaire aux rayons du soleil est de 1353 W.m^2 .

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, qui ont des absorptivités différentes en fonction des gaz les composant. Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO_2 , O_3 , H_2O) absorbent donc une partie du flux solaire qu'ils réémettent vers la terre. On trouve donc à la surface du sol terrestre différents types de rayonnement solaire [1] :

- Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus.



2.2. Méthode de détermination du rayonnement diffus

La station météo donne le rayonnement global horaire (après retraitement et agrégation des données) en W/m^2 . La corrélation de Collares-Pereira et Rabl montrée sur l'Équation 1 fournit une évaluation de l'irradiation journalière diffuse D [1] :

Équation 1 : Corrélation de Collares-Pereira

$D = 0,99 G$	$K_T \leq 0,17$
$D = (1,188 - 2,272 K_T + 9,473 K_T^2 - 21,865 K_T^3 + 14,648 K_T^4) G$	$0,17 < K_T \leq 0,75$
$D = (-0,54 K_T + 0,632) G$	$0,75 < K_T \leq 0,80$
$D = 0,2 G$	$K_T \geq 0,80$

Avec :

- D = Irradiation journalière solaire diffuse calculée en $kJ/m^2 \cdot jr$.
- G = Irradiation journalière solaire globale mesurée par la station météo, en $kJ/m^2 \cdot jr$.
- K_T = rapport entre G et G_0 , selon l'Équation 2.
- G_0 = Irradiation journalière sur un plan horizontal placé au dessus de l'atmosphère calculable selon l'Équation 3, en $kJ/m^2 \cdot jr$.

Équation 2 : Rapport K_T

$$K_T = \frac{G}{G_0}$$

Équation 3 : Irradiation journalière G_0

$$G_0 = 3,795 \cdot 10^4 \cos(L) \cos(\delta) \left[\sin(\omega_1) - \frac{\pi \omega_1}{180} \cos(\omega_1) \right]$$

Pour déterminer G , il a fallu estimer l'énergie solaire à partir de points horaires de mesure de puissance solaire instantanée, comme par exemple en cette journée du 3 août 2011, sur la Figure 28.

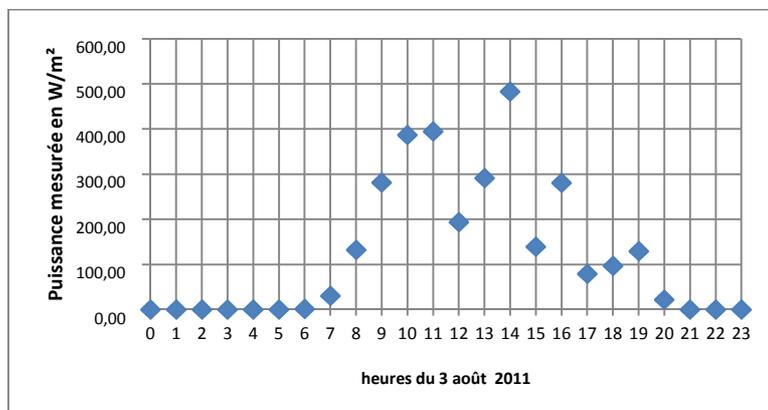


Figure 28 : Puissance instantanée mesurée

Or l'énergie journalière est l'intégrale sous la courbe reliant toutes les points de puissance instantanée. Cette intégrale a été effectuée comme présenté sur la Figure 29. La puissance instantanée prise chaque heure a été multipliée par une durée de 1 heure pour avoir l'énergie du rayonnement solaire global chaque heure de la journée. La somme journalière de ces énergies horaires donne donc G, l'irradiation journalière solaire globale mesurée par la station météo, comme défini par les

Équations 4.

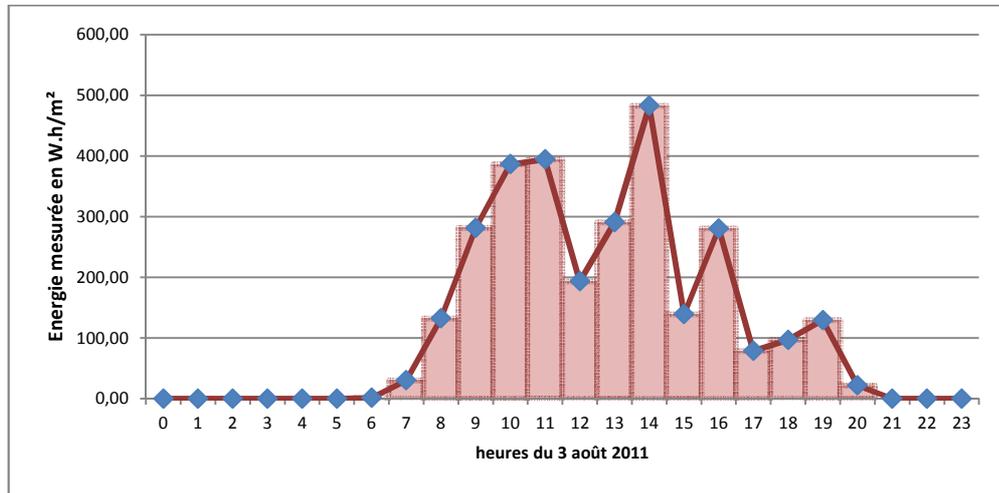


Figure 29 : Energie journalière estimée

Équations 4 : Passage de puissances instantanées à énergie journalière

$$Gh_i = G_i^* \times 1h$$

$$G = \sum_{i=1}^{24} Gh_i$$

Avec :

- Gh_i = Energie horaire du rayonnement solaire global à l'heure i en Wh/m².
- G_i^* = Puissance instantanée du rayonnement solaire global à l'heure i en W/m², donnée par la station météo.
- G = Irradiation journalière solaire globale mesurée par la station météo, en kJ/m⁻².jr.

Pour la journée du 3 août 2011, on obtient : $G = 1058,04 \text{ J/cm}^2$.

Pour revenir sur l'Équation 3, il faut maintenant déterminer δ et ω_1 pour pouvoir calculer G_0 , l'irradiation journalière sur un plan horizontal placé au-dessus de l'atmosphère. [1]

- Déclinaison δ = angle en ° formé par la direction du soleil avec le plan équatorial, calculable selon l'Équation 5.
- L = latitude du lieu considéré en °.
- ω_1 = module de l'angle horaire du lever du soleil, calculable selon l'Équation 6.

Équation 5 : Déclinaison δ

$$\delta = 23,45^\circ \sin[0,980^\circ (j + 284)]$$

Avec j = numéro du jour de l'année

Équation 6 : Module de l'angle horaire du lever du soleil

$$\cos(\omega_1) = -\tan(L) \tan(\delta)$$

Tous ces calculs nous permettent de calculer D , qui est l'irradiation journalière solaire diffuse calculée suivant l'Équation 1 : Corrélation de Collares-Pereira.

Pour la journée du 3 août 2011, on obtient : $D = 967,76 \text{ J/cm}^2$.

Pour obtenir l'irradiation diffuse horaire qui sera nécessaire à l'élaboration du fichier météo pour Pléiades, on calcule la part de rayonnement horaire global sur le rayonnement journalier global : G_{hi}/G , comme défini sur la Figure 30 pour la journée du 3 août 2011.

Puis, on applique cette même distribution sur le rayonnement journalier diffus calculé avec l'Équation 1 pour connaître le rayonnement horaire diffus. On obtient ainsi la répartition montrée sur la Figure 31 pour la journée du 3 août.

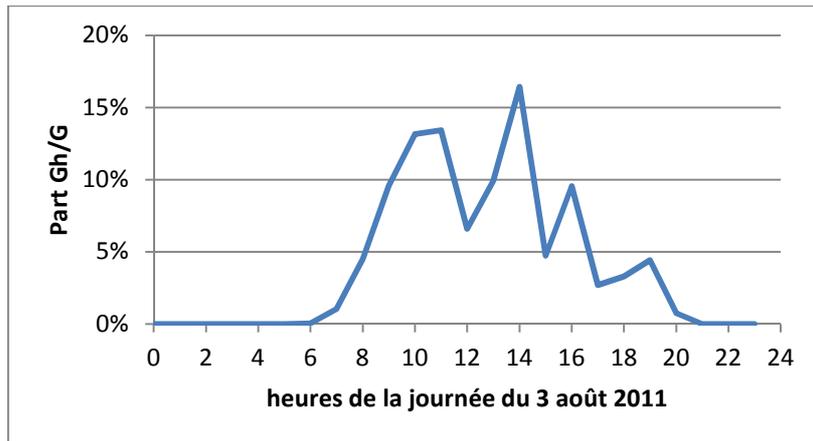


Figure 30 : part horaire du rayonnement global

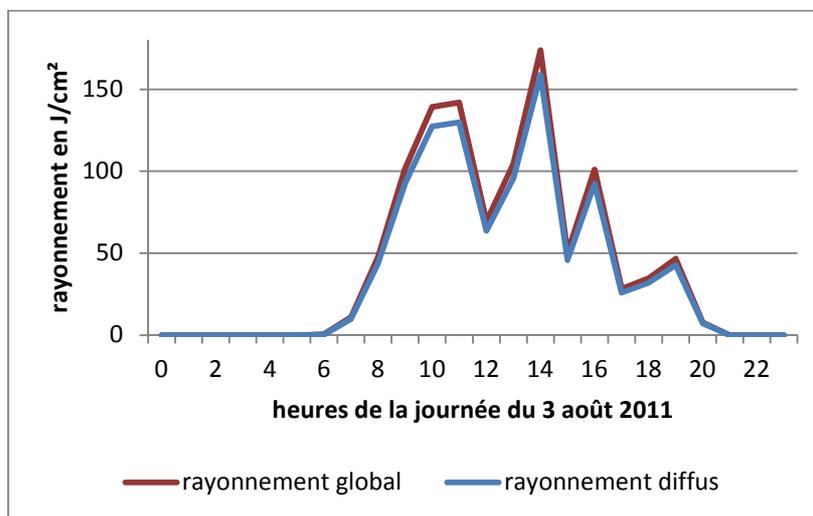


Figure 31 : répartition des rayonnements global mesuré et diffus estimé

L'ensemble des calculs présentés ci-dessus ont été automatisé avec une feuille de calcul Excel. Celle-ci permet d'obtenir un rayonnement diffus horaire à partir des données suivantes en entrée : latitude du lieu considéré et rayonnement global horaire mesuré. Un extrait de la feuille Excel est montré sur la Figure 32.

valeurs à saisir				latitude en DMS			longitude en DMS			N		E		Irradiation journalière sur un plan horizontal placé au dessus de l'atmosphère		calculé avec D'rapport de Gh/G	
				48 °	10 '	25 ''											
				6 °	27 '	6 ''											
				latitude en DD			48,1736			° N							
				longitude en DD			6,4517			° E							
				angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial		module de l'angle horaire		Eclairement solaire horaire global mesuré station météo		Irradiation solaire horaire globale mesurée : $G' \times 1h \times 0,36$		Irradiation journalière mesurée : somme journalière des Gh		Irradiation journalière diffuse calculée avec la corrélation de Collares-Pereira et Rabl			
date	jour j	heure légale TL	déclinaison δ	ω_1	date et heure importée	rayonnement global mesuré : G^*	rayonnement global mesuré : Gh	rayonnement global mesuré : G	rapport de Gh/G	Rayonnement global théorique : G_0	rapport G/G ₀ : Kt	Rayonnement diffus journalier calculé : D	Rayonnement diffus horaire Dh				
			°	°		W/m ²	J/cm ²	J/cm ²	%	J/cm ²		J/cm ²	J/cm ²				
3-août	215	0	18,22	111,58	03/08/2011 00:00	0,00	0,00	1058,04	0,0%	3957,23	0,267	967,76	0,00				
3-août	215	1	18,22	111,58	03/08/2011 01:00	0,00	0,00		0,0%				0,00				
3-août	215	2	18,22	111,58	03/08/2011 02:00	0,00	0,00		0,0%				0,00				
3-août	215	3	18,22	111,58	03/08/2011 03:00	0,00	0,00		0,0%				0,00				
3-août	215	4	18,22	111,58	03/08/2011 04:00	0,00	0,00		0,0%				0,00				
3-août	215	5	18,22	111,58	03/08/2011 05:00	0,00	0,00		0,0%				0,00				
3-août	215	6	18,22	111,58	03/08/2011 06:00	1,25	0,45		0,0%				0,41				
3-août	215	7	18,22	111,58	03/08/2011 07:00	30,25	10,89		1,0%				9,96				
3-août	215	8	18,22	111,58	03/08/2011 08:00	132,25	47,61		4,5%				43,55				
3-août	215	9	18,22	111,58	03/08/2011 09:00	281,50	101,34		9,6%				92,69				
3-août	215	10	18,22	111,58	03/08/2011 10:00	386,50	139,14		13,2%				127,27				
3-août	215	11	18,22	111,58	03/08/2011 11:00	394,25	141,93		13,4%				129,82				
3-août	215	12	18,22	111,58	03/08/2011 12:00	193,25	69,57		6,6%				63,63				
3-août	215	13	18,22	111,58	03/08/2011 13:00	290,75	104,67		9,9%				95,74				
3-août	215	14	18,22	111,58	03/08/2011 14:00	482,75	173,79		16,4%				158,96				
3-août	215	15	18,22	111,58	03/08/2011 15:00	139,00	50,04		4,7%				45,77				
3-août	215	16	18,22	111,58	03/08/2011 16:00	280,50	100,98		9,5%				92,36				
3-août	215	17	18,22	111,58	03/08/2011 17:00	78,75	28,35		2,7%				25,93				
3-août	215	18	18,22	111,58	03/08/2011 18:00	96,75	34,83		3,3%				31,86				
3-août	215	19	18,22	111,58	03/08/2011 19:00	129,50	46,62		4,4%				42,64				
3-août	215	20	18,22	111,58	03/08/2011 20:00	21,75	7,83		0,7%				7,16				
3-août	215	21	18,22	111,58	03/08/2011 21:00	0,00	0,00		0,0%				0,00				
3-août	215	22	18,22	111,58	03/08/2011 22:00	0,00	0,00		0,0%				0,00				
3-août	215	23	18,22	111,58	03/08/2011 23:00	0,00	0,00		0,0%				0,00				

Figure 32 : Feuille Excel pour déterminer le rayonnement diffus horaire

2.3. Limites de l'évaluation du rayonnement diffus

Le rayonnement diffus journalier est estimé comme montré précédemment à partir du rayonnement global. Mais la répartition horaire effectuée avec le rapport G_{hi}/G n'est pas très pertinente. En effet, on peut trouver dans la littérature l'affirmation de la non linéarité de la répartition du diffus sur la journée.

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est réduit, comme indiqué précédemment, par diffusion moléculaire, par diffusion par les aérosols et par absorption par les molécules de gaz. On estime à environ 10 % à midi en été l'atténuation due à la diffusion moléculaire. L'atténuation due aux aérosols est beaucoup plus variable, typiquement entre 5 et 60 %, selon la hauteur du Soleil et la transparence de l'atmosphère.

En l'absence de nuages et par ciel limpide, le rapport entre l'éclairement énergétique au sol des rayonnements diffus et direct peut être inférieur à 0,1 lorsque le Soleil est proche du zénith. Il croît rapidement lorsque le Soleil descend sur l'horizon et peut atteindre 0,5 pour une hauteur du Soleil inférieure à 30 degrés.

La présence de nuages modifie sensiblement l'importance respective des rayonnements diffus et direct, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant additionnel. On appelle **albédo** le rapport entre énergie réfléchie et énergie incidente. L'albédo des nuages varie typiquement de 0,4 à 0,9 selon leur nature, leur épaisseur, la hauteur du Soleil, etc. Les nuages absorbent en outre une fraction du rayonnement solaire, mais celle-ci reste assez faible et ne dépasse pas 10 % de l'énergie incidente pour les nuages les plus épais.

Lorsque les nuages se présentent sous la forme de masses isolées (cas des nuages convectifs de type cumuliforme), le rayonnement diffus varie beaucoup selon la nébulosité : lorsque la nébulosité croît, le rayonnement diffus reçu au sol commence par augmenter rapidement, puis diminue lentement vers sa valeur par ciel clair dès que la nébulosité dépasse 4 octas (moitié du ciel couverte). De gros cumulus ou cumulonimbus peuvent même augmenter le rayonnement diffus d'une façon telle que le rayonnement global dépasse momentanément la constante solaire (il peut atteindre 1 600 $W.m^{-2}$ et plus), par suite de réflexions multiples et de la forte réflectivité de tels nuages. Il en est de même par ciel couvert de nuages élevés : dans ce cas, l'essentiel et parfois même la totalité du rayonnement global est attribuable au rayonnement diffus [2] .

Ainsi, on voit que la part de diffus dans le rayonnement global dépend de la hauteur du soleil, donc peut varier fortement tout au long de la journée. Une méthode de répartition plus fine permettrait d'avoir un fichier horaire plus précis, et plus juste. On pourrait par exemple s'appuyer sur les équations empiriques de Perrin de Brichambaut [3] pour estimer la part de diffus dans le global en fonction de la hauteur du soleil. Ces formules empiriques permettent de calculer les rayonnements global et diffus théoriques. On obtient par exemple pour la journée du 3 août les courbes présentées dans la Figure 33.

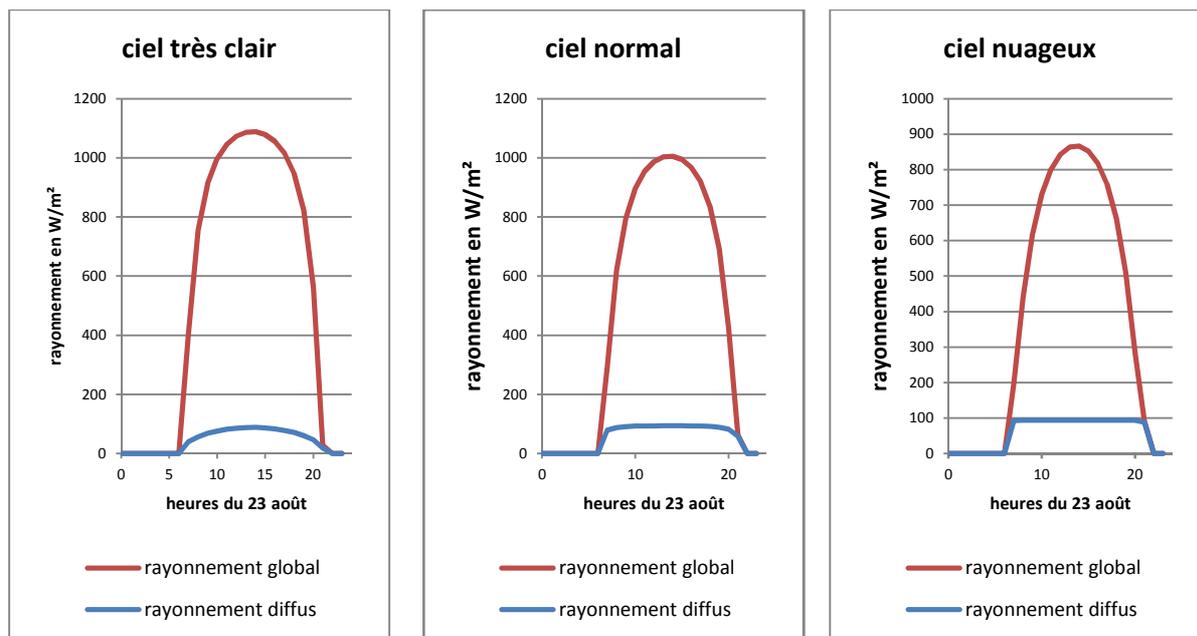


Figure 33 : répartition du diffus selon le modèle de Perrin de Brichambaut

Ce modèle de Perrin de Brichambaut montre clairement que par ciel couvert, la part de diffus dans le rayonnement global est très importante quand le soleil est bas sur l’horizon, et que cette même part est plus faible lorsque le ciel est bien dégagé.

Il aurait été possible de modéliser cette répartition plus fine, mais l’étape de validation des résultats nous a montré que l’erreur faible entre notre estimation et la réalité ne justifiait d’affiner ce résultat.

2.4. Validation de la valeur du rayonnement diffus

Pour valider les résultats du rayonnement diffus horaire estimé, nous avons comparé les résultats donnés par Pléiades pour le module ACMB avec deux fichiers météo différents :

- Réel : fichier météo de la ville de Nancy, présent d’origine dans le logiciel Pléiades.
- Estimé : Le même fichier météo, mais dont le rayonnement diffus réel a été supprimé et remplacé par le rayonnement diffus calculé par la feuille Excel comme présenté en 2.2

On peut commencer par comparer le rayonnement diffus journalier réel avec l’estimé. Pour cela, on a calculé la différence journalière avec l’opération suivante : $(\text{mesuré} - \text{calculé})/\text{mesuré}$. En intégrant les valeurs sur une année complète, on obtient une différence moyenne de -8 % avec un écart type de 14%. La dispersion des différences journalières est représentée sur la Figure 34.

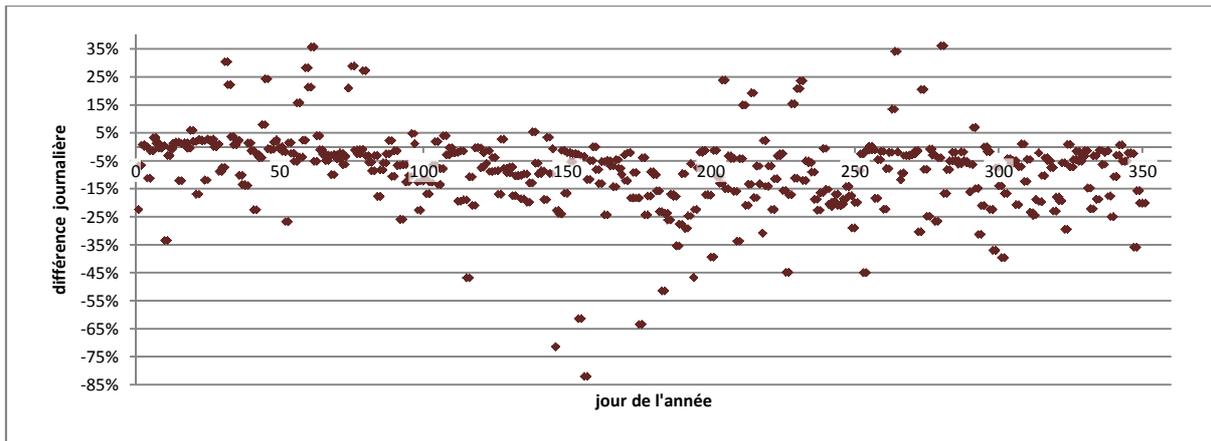


Figure 34 : différences journalières des rayonnements diffus réel et estimé.

Pour le fichier météo de Nancy, on se rend compte que l'estimation du rayonnement diffus est globalement plus importante (de l'ordre de 8% sur une année) que la mesure réelle. Voyons maintenant à l'échelle d'une semaine, la différence de répartition du rayonnement diffus. La Figure 35 et la Figure 36 montrent la différence de répartition du rayonnement diffus réel par rapport au rayonnement diffus estimé à deux périodes différentes.

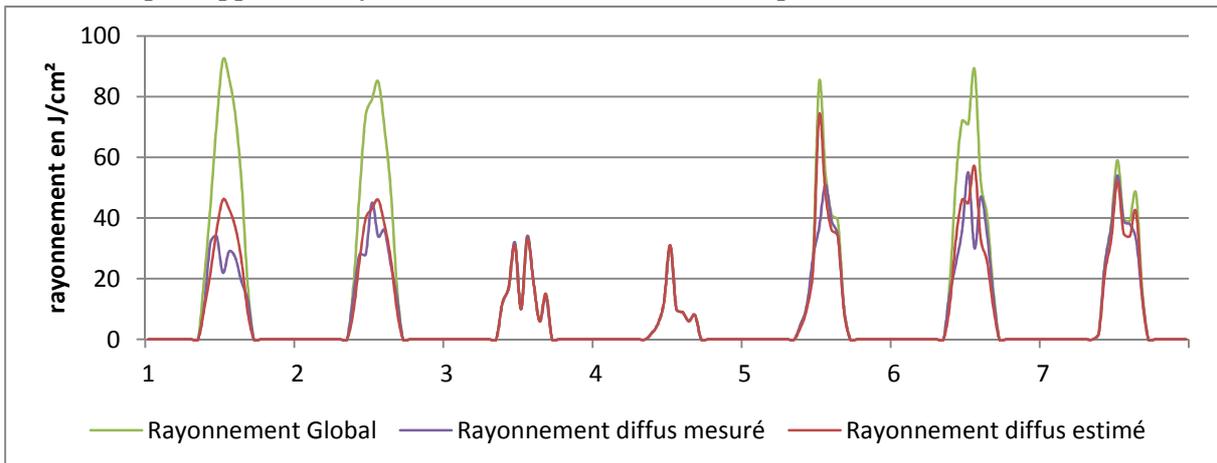


Figure 35 : Rayonnements global mesuré, diffus mesuré et diffus estimé du 1^{er} au 7 janvier

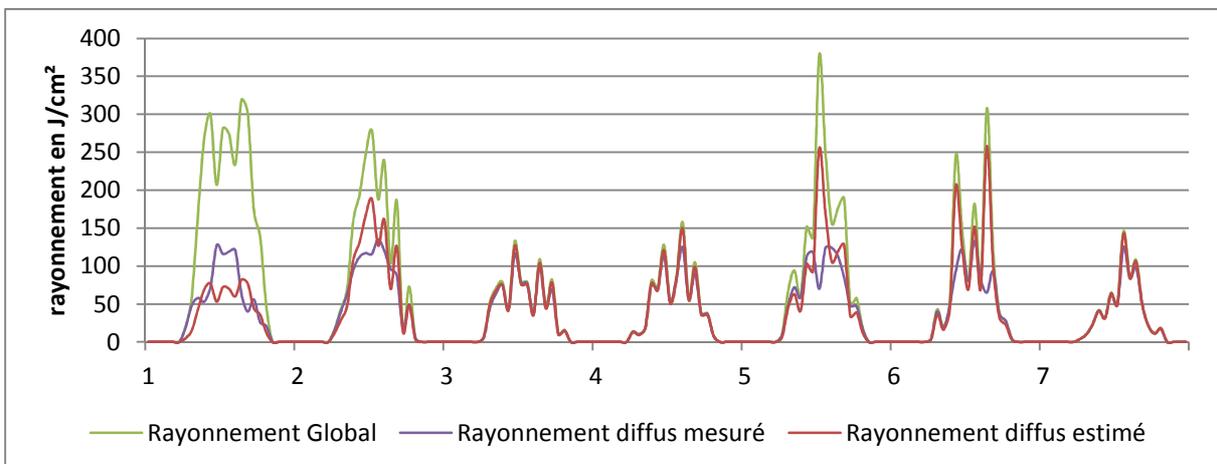


Figure 36 : Rayonnements global mesuré, diffus mesuré et diffus estimé du 1^{er} au 7 août

Comme expliqué précédemment, on se rend compte des différences entre le diffus réel et le diffus estimé, notamment avec un effet d'accentuation des pics dans notre estimation alors que le rayonnement diffus est en réalité plus lissé.

Enfin, nous avons validé notre estimation avec deux simulations sous Pléiades. Celles-ci ont été effectuées avec tous des paramètres identiques, pour ne comparer que l'influence du type de rayonnement diffus (réel. ou estimé) sur le résultat final. Le Tableau 15 présente les résultats des deux simulations pour une année complète, le *cas réel* étant la simulation avec le fichier météo réel de Nancy et le *cas estimé* étant la simulation avec le même fichier météo mais dont le rayonnement diffus est estimé. La différence est : $(réel - estimé)/réel$.

Tableau 15 : Comparaison sous Pléiade des cas réels et estimés

	Besoin chauffage	Puissance de chauffage	Température maximum	Déperditions	Chaleur Solaire sensible
Cas réel	688 kWh	244 W	23,16 °C	783 kWh	95 kWh
Cas estimé	678 kWh	243 W	23,39 °C	772 kWh	94 kWh
Différence	1,45 %	0,41 %	-0,88 %	-1,40 %	1,05 %

On a regardé l'évolution au cours de l'année des besoins de chauffage. Ceux-ci sont présentés sur la Figure 37. Celle-ci montre aussi la différence = (réel-estimé) des besoins de chauffage.

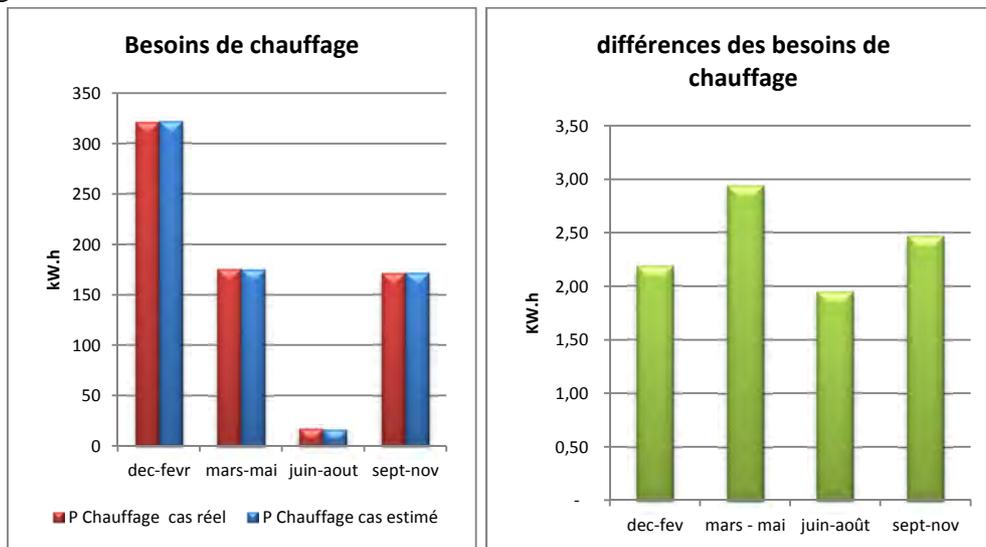


Figure 37 : évolution de la consommation pour les besoins de chauffage par saison

On remarque que la différence se répartie régulièrement sur l'année avec une consommation globalement plus faible pour le cas estimé (de l'ordre de 1,5% sur l'année).

Le besoin de chauffage annuel et la puissance de chauffage sont très sensiblement égaux pour les deux cas, donc on peut valider le modèle d'estimation du rayonnement diffus que nous avons utilisé.

3. CREATION DU FICHER METEO

3.1. Démarche générale

Le fichier météo pour Pléiades est créé sous MeteoCalc, un logiciel lié à PLEIADES. On donne en entrée un fichier Excel enregistré en .csv, on paramètre MeteoCalc pour que le logiciel retrouve la correspondance des valeurs, puis MeteoCalc produit un fichier texte avec une structure bien définie. Ce fichier météo est une entrée indispensable pour Pléiade.

3.2. Démarche détaillée

- Ouvrir le fichier Excel « meteo_pour_MeteoCalc.csv »
- Compléter les colonnes Température, Rayonnement Global et Rayonnement Diffus comme montré sur la Figure 38 en prenant en compte les conditions suivantes :
 - o Tous les nombres sont entiers arrondis à l'unité.
 - o La température est en dixièmes de degrés (par exemple, 10,1 °C se notera 101).
 - o Les rayonnements sont en J/cm².

Le rayonnement diffus peut être estimé à partir du rayonnement global, comme présenté précédemment, avec la feuille Excel « calcul_rayonnement_diffus.xlsx ».

- Enregistrer en .csv et fermer « meteo_pour_MeteoCalc.csv ».

	A	B	C	D	E	F
1	Température	Rayonnement Global	Rayonnement diffus	Mois	Jour	Heure
2	<i>en 1/10 °C</i>	<i>en J/cm²</i>	<i>en J/cm²</i>			
3	101	0	0	1	1	0
4	100	0	0	1	1	1
5	101	0	0	1	1	2
6	103	0	0	1	1	3
7	102	0	0	1	1	4

Figure 38 : exemple de la feuille Excel en .csv

- Ouvrir Pléiades, puis MeteoCalc.
- Compléter les champs comme présenté sur la Figure 39 en n'oubliant pas de saisir 2 pour le nombre de lignes de l'entête.

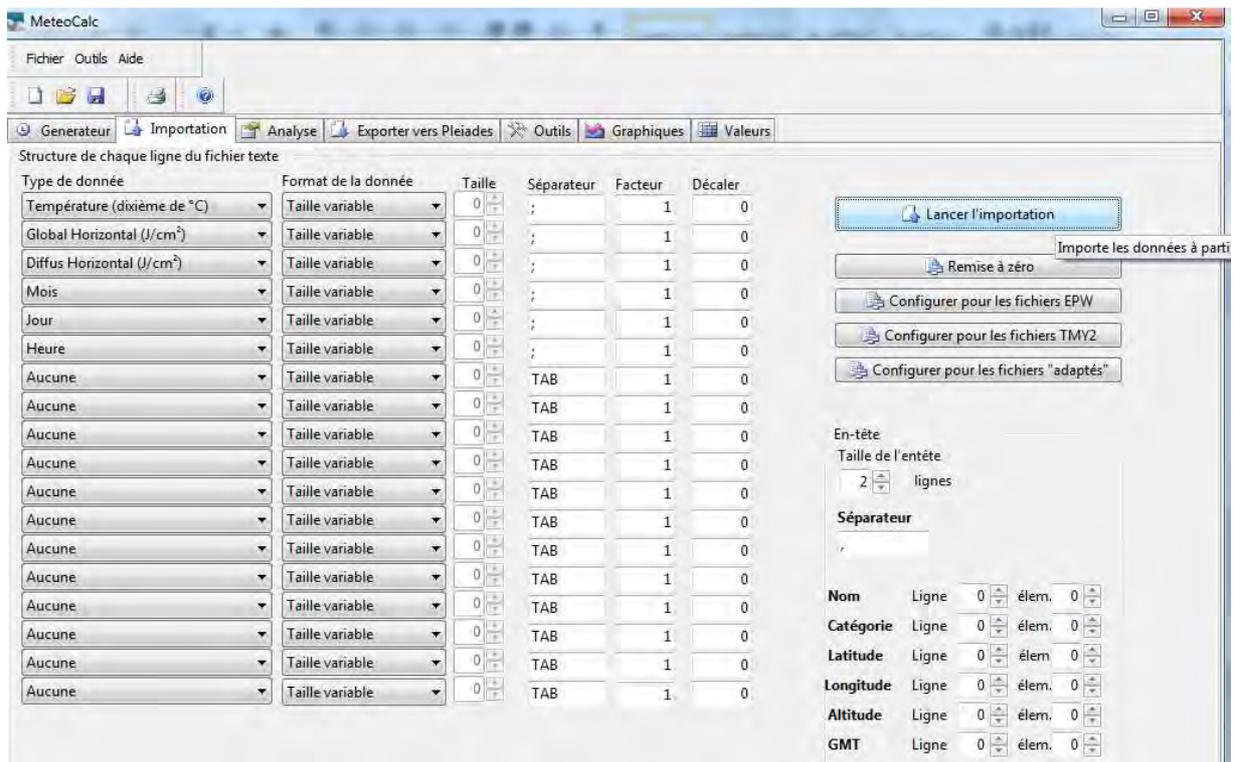


Figure 39 : Paramétrage de MeteoCalc

- Cliquer sur lancer l'importation, sélectionner le fichier « meteo_pour_MeteoCalc.csv », puis lancer l'importation.
- Cliquer sur l'onglet Analyse pour vérifier les erreurs, les corriger, et enregistrer le fichier. Le fichier météo est alors créé sous le format « .try ».

Partie 4 : **PUISSANCE ARMOIRE**

ELECTRIQUE

1. PRESENTATION



Figure 40 : armoire électrique

Chaque module est équipé d'une armoire électrique (Figure 40) comportant les boîtiers d'acquisition des données et une alimentation générale. Ces armoires dissipent de l'énergie qui chauffe l'air dans le module et qui n'est pas comptabilisée par les compteurs d'énergie branchés sur la résistance chauffante et sur l'humidificateur.

Ainsi, pour comparer la modélisation de la consommation pour le chauffage sur Pléiade avec la consommation électrique de chauffage réel, il nous faut connaître la puissance dissipée par les appareils électriques. Il a fallu effectuer une mesure sur les modules pour connaître cette puissance réelle.

2. METHODE D'ESTIMATION DE LA PUISSANCE

Il a été estimé que la puissance de l'armoire électrique était constante dans le temps. De plus, il a été pris l'hypothèse que l'ensemble de l'énergie consommée par l'armoire était dissipée en chaleur.

La puissance a été estimée à partir de la relation suivante :

$$\text{Puissance (W)} = \text{Tension (V)} \times \text{Intensité (A)}.$$

La tension et l'intensité ont été mesurées sur les modules comme présenté sur la Figure 41.

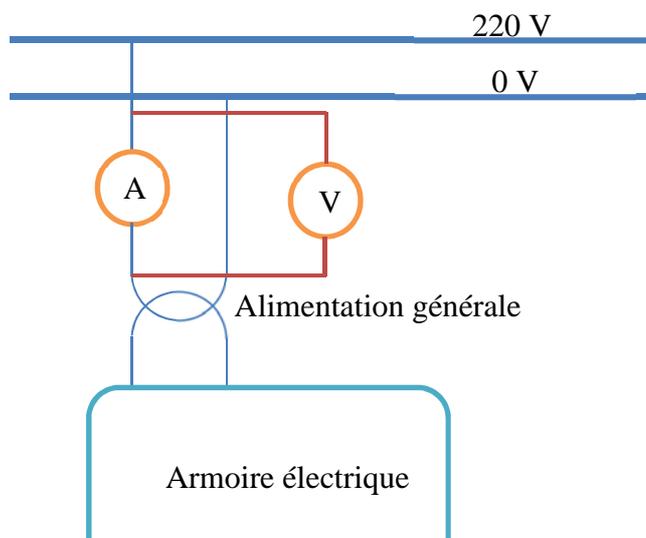


Figure 41 : schéma de mesure de la tension et de l'intensité

3. RESULTAT DE LA PUISSANCE

La puissance de l'armoire a été calculée pour les modules ACMB, KLH, Ecologia 1 et madriers. La mesure de l'intensité a une variation de $\pm 0,5$ mA et celle de la tension de $\pm 0,5$ V. On en déduit une variation de $\pm 0,14$ W pour la puissance de l'armoire.

Chaque armoire comporte 5 compteurs d'énergie FINDER 7E.23.8.230.00x0 [10] qui ne sont pas raccordés à l'alimentation générale. Seulement deux collectent des données, mais tous sont alimentés en permanence. Leur puissance maximale est de 0,4 W, et pour se mettre dans le cas le plus défavorable possible (tous les compteurs consomment et dissipent le maximum de leur puissance), la puissance totale des compteurs sera de : $0,4$ W x 5 compteurs = 2,00 W.

Devant la variabilité des résultats de la puissance totale par module alors que toutes les armoires sont identiques et sont censés consommer la même énergie, il a été décidé de prendre la puissance moyenne pour l'utilisation dans la suite des résultats. Les résultats sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : puissance dissipée par les armoires électriques

module	Intensité (+0,5 mA)	tension (+0,5 V)	Puissance armoire (+ 0,14 W)	Puissance compteur énergie	puissance totale : (+ 0,14 W)
	mA	V	W	W	W
ACMB	58,5	225	13,16	2,00	15,16
KLH	58	222	12,88	2,00	14,88
Ecologia 1	56	221,5	12,40	2,00	14,40
madriers	58	217	12,59	2,00	14,59
				Moyenne :	14,76

Une puissance de 14,76 W dissipe une énergie annuelle de 129 kWh, soit environ 20 % de la consommation annuelle de chauffage pour un module de 9 m².

Partie 5 : MODELISATION

1. INTRODUCTION

Afin de modéliser les modules nous avons décidé d'utiliser l'ensemble de logiciel ALCYONE + PLEIADES + COMFIE. Cet ensemble de logiciels est complémentaire, ALCYONE permet de représenter rapidement et efficacement la géométrie et la composition d'un module, PLEIADES crée la bibliothèque comprenant les données nécessaires pour réaliser la composition des parois, ainsi que l'exploitation du modèle fournie par ALCYONE. Cependant pour pouvoir analyser les résultats, PLEIADES utilise le moteur de simulation COMFIE. Cette complémentarité est explicité dans la Figure 42 suivante :

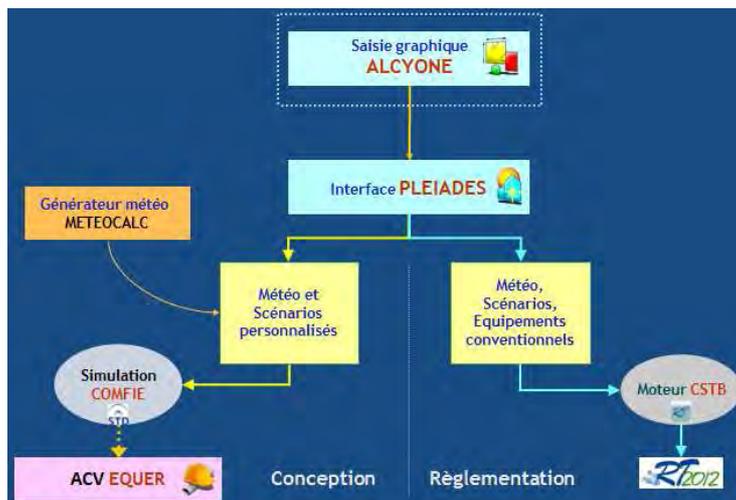


Figure 42 : Schéma de fonctionnement des différents logiciels entre eux

2. PRESENTATION DU LOGICIEL ALCYONE

2.1. Introduction

ALCYONE a été conçu par IZUBA Energie pour faciliter la saisie de bâtiments sur PLEIADES+COMFIE. Il permet de définir l'ensemble des paramètres géométriques du bâtiment, d'attribuer à chacune des parois ses caractéristiques thermiques, de préparer le zonage thermique et d'attribuer rapidement les scénarios d'utilisation.

2.2. Modélisation

Nous avons donc commencé par définir les propriétés géométriques du bâtiment ainsi que les volumes.

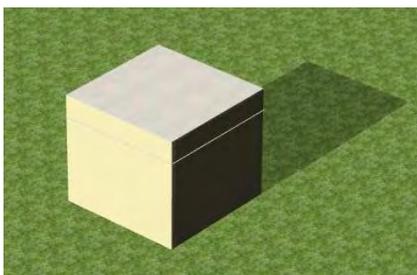


Figure 44 : Vue 3D du module modélisé sous ALCYONE

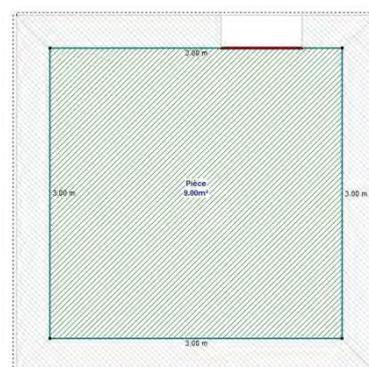


Figure 43 : Vue de dessus du module modélisé 46

Ensuite, grâce à la bibliothèque PLEIADES, nous avons renseigné les compositions des parois ainsi que leurs propriétés thermiques comme illustré dans la Figure 45.

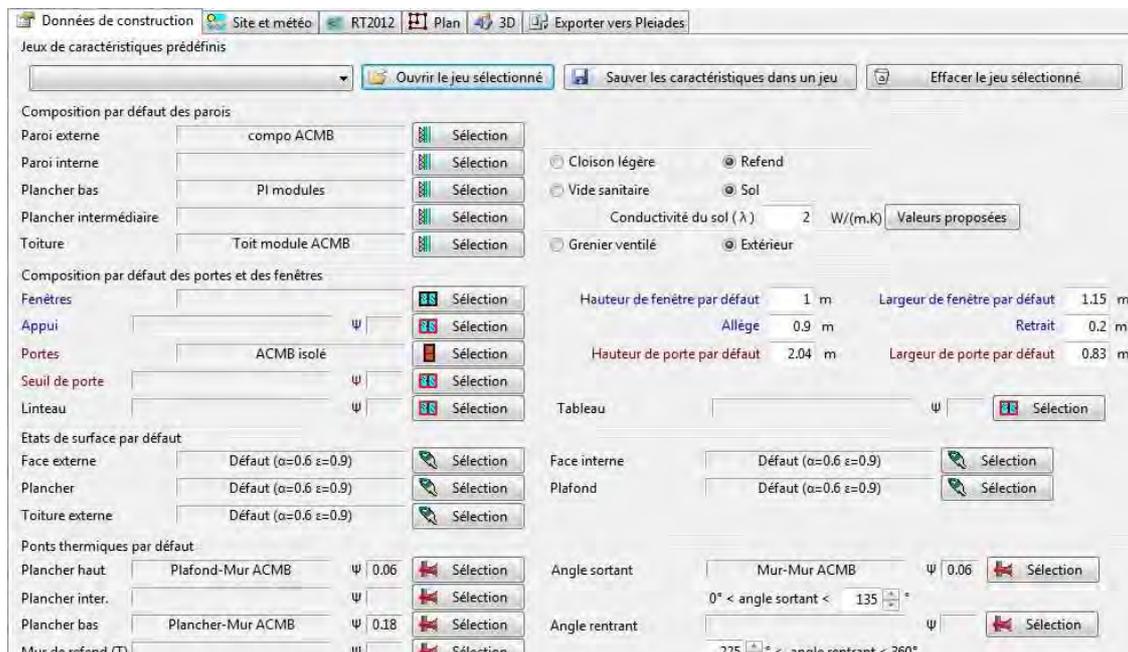


Figure 45 : Ecran de sélection des différentes compositions

Le module possède ainsi toutes ses caractéristiques. Il reste donc à définir l'environnement dans lequel celui-ci évolue, ceci est réalisé grâce à l'onglet « site et météo » où l'on renseigne la localisation géographique du module, son altitude comme illustré dans la Figure 46. On peut également calculer l'horizon du module (en cas de présence de montage) grâce au module Carnaval.

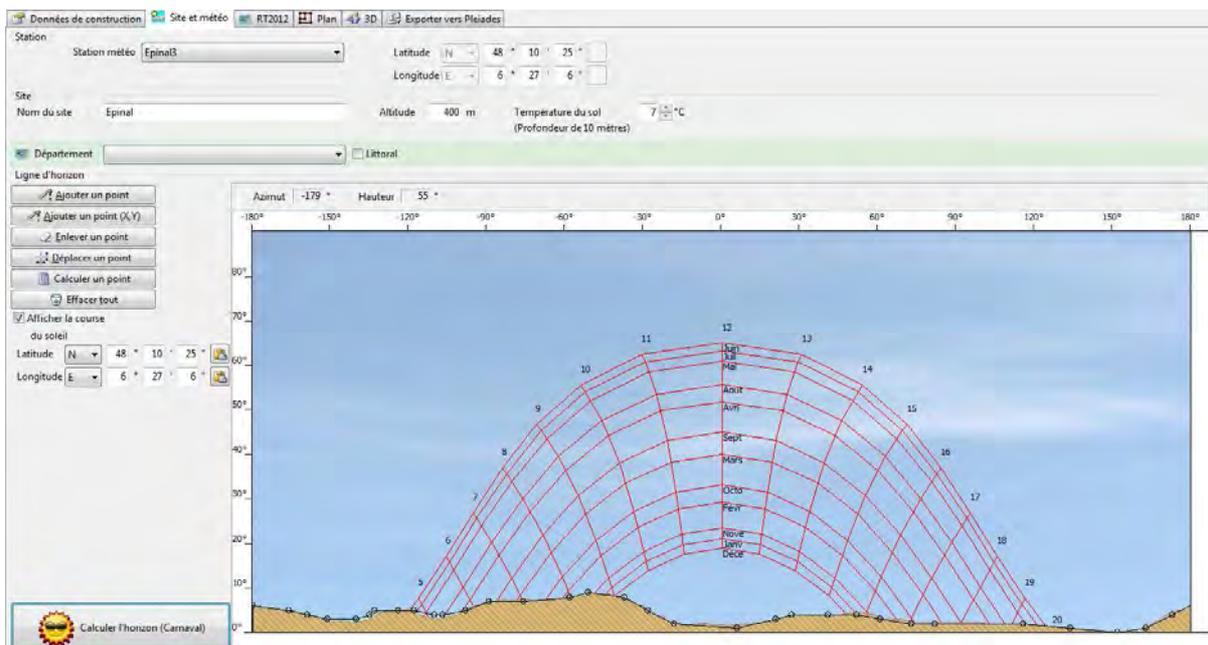


Figure 46 : Ecran de saisie des paramètres météorologiques et géographiques du bâtiment

La modélisation est donc terminée sous ALCYONE, il ne reste plus qu'à exporter la modélisation sous PLEIADES grâce à l'onglet prévu à cet effet.

3. PRESENTATION DU LOGICIEL PLEIADE+COMFIE

3.1. Introduction

PLEIADES est un logiciel de dimensionnement thermique dynamique développé par Izuba énergie. Il existe sur le marché plusieurs logiciels du même type tels que Trnsys (Logiciel développé par le CSTB), CoDyBa, ou encore DesignBuilder pour ne citer que les plus utilisés.

Ces logiciels permettent un raisonnement à l'échelle du bâtiment en prenant en compte à la fois les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés mais également le comportement global du bâtiment vis-à-vis de la ventilation, des apports solaires, de l'occupation...

La simulation thermique dynamique est un outil d'évaluation de l'impact de différentes configurations d'un bâtiment sur les besoins en chauffage, le confort thermique ou le comportement global du bâtiment. Chaque étude intègre en entrée des scénarios de ventilation, de chauffage ou d'occupation et le calcul se fait au pas horaire en intégrant les données météo du site (ou d'un site proche).

Paramètres d'entrée

Structure :

Composition de l'enveloppe, caractéristiques des menuiseries, orientation, masque solaire

Equipement :

Système de ventilation, de chauffage, de production d'énergie...

Fonctionnement :

Scénario d'occupation, consigne de température, apports internes, météo du site ...

Simulation
thermique
dynamique



Paramètres de sortie

Evolution des températures au pas du calcul

Besoins en chauffage

Besoin en climatisation

Consommations annuels

3.2. Saisies des données



Bibliothèque thermique

Bibliothèque de matériaux, d'éléments constructifs, de menuiseries, d'états de surface, d'albédos, d'écrans végétaux... L'utilisateur peut compléter cette bibliothèque.



Les scénarios hebdomadaires ou annuels sont définis dans ce module.

Le scénario d'occupation correspond aux taux d'occupation pour un certain nombre d'occupants, il permet d'estimer les apports internes de chaleur métabolique, autrement dit l'énergie dissipée par les occupants (environ 80W / personne).

Les scénarios de chauffage et de refroidissement correspondent aux consignes minimum et maximum de température qui vont déterminer la mise en route du chauffage ou de la climatisation.

Le scénario de ventilation externe représente les échanges d'air, contrôlés ou incontrôlés (défaut d'étanchéité) avec l'extérieur.

Un scénario de ventilation interne permet de prendre en compte les mouvements d'air entre zones thermiques qu'ils soient naturels (ouverture d'une porte) ou forcés (ventilation mécanique).

Le scénario de puissance dissipée permet de prendre en compte l'énergie thermique émise par les appareils électriques, l'éclairage...

La bibliothèque permet de créer des compositions de paroi et de les exporter dans un projet.



Saisie multizone du bâtiment

Description détaillée de la structure, caractéristiques des pièces et des parois (contact, dimensions, compositions, écrans, exposition au vent, albédos, ouvertures...). Possibilité d'ajouter et de supprimer des parois et des pièces.



Interface Comfie

Saisie des données sur l'environnement du projet et son fonctionnement : site et station météo de référence, obstacles environnants (masques proches, horizon), définition des zones thermiques et affectation des scénarios de température, de climatisation, de ventilation externe, de ventilation interne, d'occupation et de puissance dissipée.

Lancement du calcul COMFIE et exploitation les résultats (graphiques, synthèse, comparaison...)

3.3. Données d'entrée

Grâce aux fiches techniques fournisseurs et à certaines données déjà présentes dans la bibliothèque PLEIADES, nous avons renseigné tous les composants des différents modules (isolant, modélisation paroi, porte, ponts thermiques, Albédos...) comme le montre la Figure 47 en essayant d'être au plus près des caractéristiques réelles des matériaux afin de minimiser la marge d'erreur provenant de ces caractéristiques.

Nom	Module ACMB					
Complément						
Origine	Origine des caractéristiques					
Caractéristiques thermiques						
Données RT						
Composants	T	cm	kg/m ²	λ	R	
lame d'air ventilée		0.1	0	0.011	0.09	Extérieur ↓ Intérieur
Fibre de bois HD		3.5	9	0.046	0.76	
Sylvatis 55 FX		20.0	10	0.036	5.56	
MFP		1.2	8	0.130	0.09	
Lame d'air 4 mm flux horiz.		4.0	0	0.222	0.18	
Fermacell utilisé		1.3	15	0.320	0.04	
Total		30.1	42		6.72	

Figure 47 : Ecran récapitulatif de la composition de la paroi du module ACMB sous PLEIADES

Lorsqu'un élément est créé, il est sauvegardé dans le projet et envoyé dans la bibliothèque. C'est de cette bibliothèque, que proviendront les éléments intégrés dans ALCYONE (cf. II.2.2)

Pour notre modélisation, nous avons testé le module ACMB avec tous paramètres égaux sauf pour la présence ou non d'albédos (herbe humide, béton ...). D'après les résultats et ne relevant aucune différence entre les deux modélisations, nous avons décidé de ne pas prendre d'albédos. L'absence de différence peut s'expliquer par le fait que PLEIADES prend un albédo par défaut et que n'ayant pas de surface vitrée, l'impact est négligeable.

L'enveloppe est considérée comme étanche à l'air, la ventilation est donc nulle, le module n'est pas occupé, la consigne de température est de 20°C toute l'année et aucun système de ventilation ne régule en température durant la période estivale. De plus les apports solaires sont nuls puisque les modules ne possèdent pas de surface vitrée.

3.4. Analyse des données

Nous avons modélisé le comportement du module sur Pléiade pour obtenir en sortie différents paramètres. PLEIADES ne permet ni de calculer les températures à l'intérieur des matériaux ni les températures de surface. Seule l'évolution de la température d'ambiance des différentes zones thermiques peuvent être extraites. Ces températures sont calculées toutes les heures.

Cependant le logiciel PLEIADES + COMFIE se décompose en deux parties. La partie Pléiade comme présentée précédemment ne permet pas de lancer la simulation, c'est le noyau de calcul développé par le Centre d'Énergétique de l'Ecole des Mines de Paris qui la réalise. Donc une fois le projet entièrement saisie, l'interface COMFIE lance la simulation dynamique.

4. LOGICIEL COMFIE

Le logiciel COMFIE après avoir réalisé la simulation fournit différents paramètres en sortie (cf. Figure 48) :

Apports solaires bruts : énergie qui pénètre dans le bâtiment par les vitrages sur l'année.

Besoins Chauff+Froid : somme des besoins nets de chauffage et de rafraîchissement par m³. Les besoins en chauffages sont exprimés en énergie primaire.

Moyenne Surchauffe Max. : moyenne (en dixième de degré) de dépassement de température durant la période de surchauffe la plus importante

Amplification de T°ext : moyenne des pourcentages journaliers d'amplification (augmentation ou réduction) de la température extérieure.

Taux d'inconfort : pourcentage de temps d'occupation durant lequel la température a été supérieure à la consigne de climatisation (ou à une valeur seuil de 27°C par défaut si le bâtiment n'est pas climatisé) ou inférieure à la consigne de chauffage.

Part de besoins nets : pourcentage de besoins nets de chauffage par rapport aux besoins de base (déperditions).

Déperditions : déperditions thermiques de chaque zone.



Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
Zones	Apports solaires bruts	Conso Eclairage	Moyenne Surchauffe Max	Amplification de T°Ext	Taux d'inconfort	Part de besoin nets	Déperditions		

Figure 48 : Ecran de présentation des résultats sous COMFIE

Partie 6 : RESULTATS

1. REPARTITION DES DEPERDITIONS

1.1. Introduction

Les modules ont été modélisés en stationnaire avec les caractéristiques des parois et des ponts thermiques définis précédemment. Les règles Th-U ont été appliquées pour cette modélisation.

Le but de cette modélisation est d'évaluer quantitativement l'influence de la toiture, de la porte, du plancher et des ponts thermique sur les déperditions énergétiques de ces modules.

En effet, ceux-ci ont été conçus pour avoir la meilleure visibilité possible sur les échanges thermiques à travers les murs. Pour cela, la toiture, le plancher et la porte ont été conçus avec des matériaux très isolants et en forte épaisseur. Une feuille Excel a permis de paramétrer et sortir les résultats de la modélisation en stationnaire pour les modules, comme présentés sur le Tableau 17.

1.2. Le module ACMB

La modélisation du module ACMB pour déterminer la répartition des déperditions est détaillée dans cette partie. Une première simulation a été faite en stationnaire, et une deuxième en dynamique.

La Figure 49 montre la répartition des déperditions totales (en W/K) pour module ACMB avec la modélisation en stationnaire. On se rend compte que la part du flux total passant uniquement par les murs n'est seulement que de 44%. On remarque aussi que les ponts thermiques ont une influence considérable sur la modélisation thermique. En effet, ceux-ci représentent plus d'un tiers du flux total. Comme les ponts thermiques ont été calculés avec un logiciel d'éléments finis qui donne un résultat approché (estimation de l'erreur de 2 à 3 % par THERM), on peut s'interroger dès cette étape sur la validité du reste des résultats à suivre.

Tableau 17 : Modélisation en stationnaire du module ACMB

		Parois considérées							TOTAL	
		Nord	sud	est	ouest	sol	plafond			
surface totale en m ²		7,20	7,20	7,20	7,20	9,00	9,00	46,80		
déperditions surfaciques	parois opaques	U (W/m ² .K)	0,152	0,152	0,152	0,152	0,110	0,070		
		Déperditions (W/K)	0,84	1,09	1,09	1,09	0,99	0,63	5,73	
	Ouvertures	Déperditions (W/K)	Nb	Nb	Nb	Nb	Nb	Nb		
		porte	1	0,19						
		Déperditions (W/K)	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	
	Total	Déperditions surfaciques	1,03	1,09	1,09	1,09	0,99	0,63	5,924	
		pourcentage	88%	89%	89%	89%	32%	48%	64%	
	déperditions linéiques	parois opaques	partie basse					2,148		
			partie haute						0,672	
			liaisons verticales	0,134	0,134	0,134	0,134			
Déperditions (W/K)			0,134	0,134	0,134	0,134	2,148	0,672	3,36	
Ouvertures		porte	1	0						
Total		Déperditions linéiques	0,134	0,134	0,134	0,134	2,148	0,672	3,358	
		pourcentage	12%	11%	11%	11%	68%	52%	36%	
<i>Déperditions totales (W/K) :</i>		1,164	1,227	1,227	1,227	3,137	1,299	9,282		
<i>pourcentage</i>		13%	13%	13%	13%	34%	14%	100%		

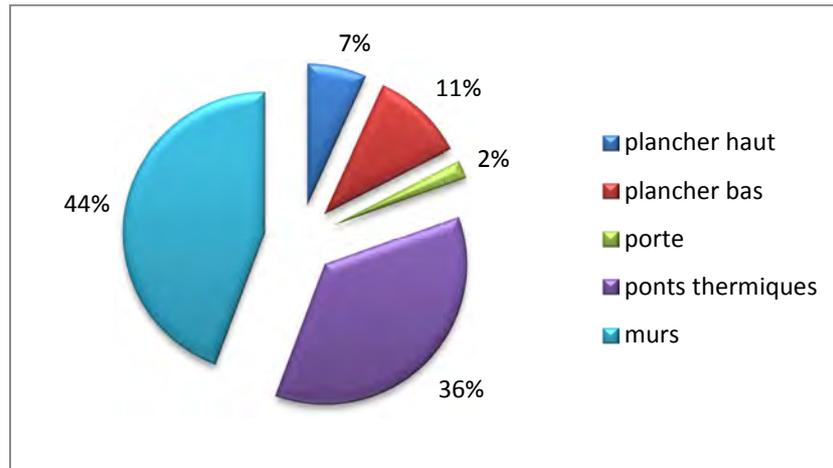


Figure 49 : répartition des déperditions totales du module ACMB

Ces résultats ont été confirmés par des modélisations sous le logiciel PLEIADES du module ACMB en ne faisant varier que certaines compositions et en regardant le flux thermique associé. Tous autres paramètres égaux à partir de la modélisation de base, nous avons changé les compositions suivantes :

- 1) Toiture et plancher adiabatique ($R_{\text{plancher}} = 1000 \text{ m}^2.\text{K/W}$ et $R_{\text{toiture}} = 1000 \text{ m}^2.\text{K/W}$)
- 2) Porte adiabatique ($R_{\text{porte}} = 100 \text{ m}^2.\text{K/W}$)
- 3) Sans ponts thermiques

Nous avons obtenus les résultats présentés dans le Tableau 18.

Tableau 18 : variation des flux thermiques du module ACMB

	Flux total annuel	Besoins de chauffage annuels	Chaleur solaire sensible
Modèle ACMB normal	808 kWh	712 kWh	96 kWh
Toiture et plancher adiabatique	681 kWh	607 kWh	74 kWh
Porte adiabatique	793 kWh	697 kWh	96 kWh
Sans ponts thermiques	519 kWh	422 kWh	97 kWh

On peut en déduire la part du flux qui passe dans chaque élément du module comme présenté dans le Tableau 19. Le flux passant dans les murs est le total moins la somme des autres flux.

Tableau 19 : parts des flux thermiques annuels du module ACMB

	Flux annuel	Proportion
TOTAL	808 kWh	
Toiture et plancher	127 kWh	15,7 %
Porte	15 kWh	1,9 %
Ponts thermiques	289 kWh	35,8 %
Murs	377 kWh	46,6 %

Nous avons pensé judicieux de regarder l'évolution de cette proportion au cours d'une année. Pour cela, nous avons sorti le fichier horaire des résultats de Pléiades, et à partir des puissances de chauffage instantanées horaires, nous avons ressorti l'évolution de la consommation de chauffage pour chaque élément du module, comme présenté sur le Tableau 20. Attention à ne pas confondre les besoins de chauffage avec les flux totaux du Tableau 19, car le flux total comprend le besoin de chauffage plus la chaleur solaire sensible.

Tableau 20 : Parts des besoins de chauffage annuels du module ACMB

	Flux Annuel	Proportion moyenne	Ecart-type
TOTAL	710 kWh		
Toiture et plancher	105 kWh	13,8%	1,1%
Pont thermique	289 kWh	40,2%	1,4%
Porte	15 kWh	2,0%	0,1%
Murs	302 kWh	44,0%	2,4%

La variation de la proportion des besoins de chauffage au cours de l'année est représentée sur la Figure 50 .

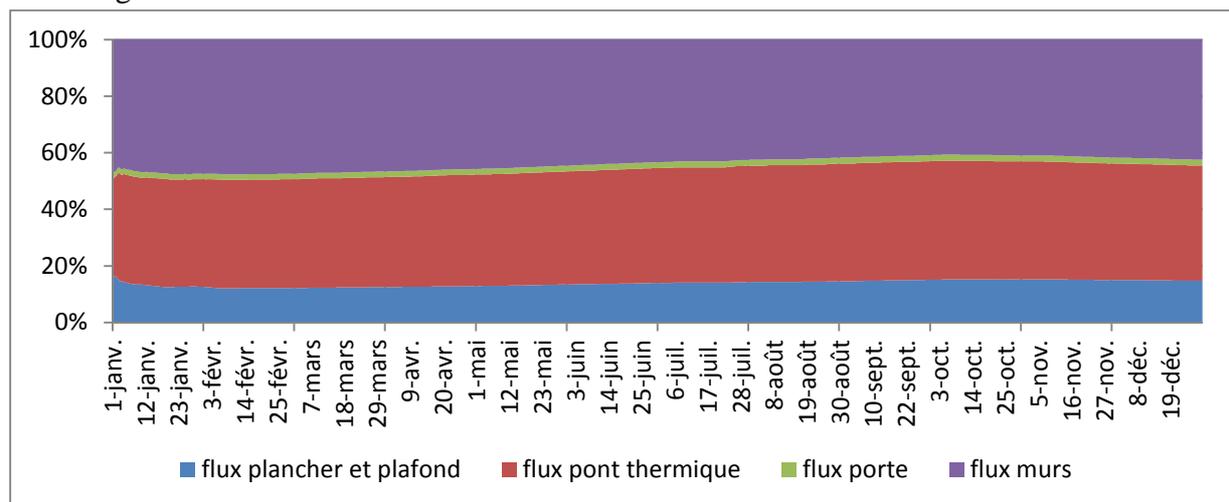


Figure 50 : évolution de la répartition des flux au cours d'une année.

On remarque que cette proportion est relativement constante tout au long de l'année, avec une faible variation qui est principalement due au fait que l'analyse dynamique ne tient pas compte de la chaleur solaire sensible mais uniquement du besoin de chauffage.

1.3. Répartition moyenne des déperditions thermiques

Tous les modules ont été modélisés en stationnaire pour déterminer leur propre répartition des déperditions thermiques. L'ensemble des résultats est présenté en Annexe 3 : répartition des déperditions thermiques. On remarque la répartition moyenne présentée sur la Figure 51. La part des murs est minimum pour le module ACMB (44 %) et maximum pour le module KLH (53 %).

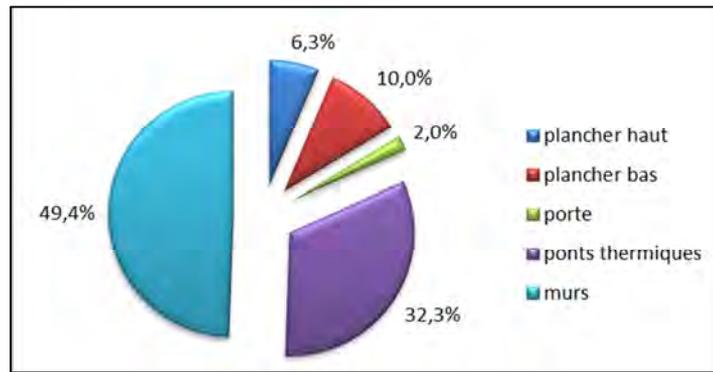


Figure 51 : répartition moyenne des déperditions thermiques

2. FICHER METEO – PERIODE DE SIMULATION

Le fichier météo pour la simulation sur Pléiades a été créé comme décrit précédemment, avec estimation du rayonnement diffus. Néanmoins, nous ne possédions que les données de la station météo de l'ENSTIB du 1 août 2011 au 6 février 2012. Pour avoir un fichier météo annuel, nous avons rajouté les données du fichier météo de Nancy (données Pléiades) pour la période du 7 février au 31 juillet.

De plus, pour comparer les résultats de Pléiades avec les données relevées par les capteurs des modules, nous n'avons retenu que la période du 1^{er} décembre 2011 au 5 février 2012. En effet, les modules n'étaient pas complètement terminés avant le 1^{er} décembre, les valeurs de consommations réelles étaient faussées par l'absence du traitement des ponts thermiques autour des portes des modules.

3. COMPARAISON DES MODELISATION

3.1. Introduction

Ainsi après avoir modélisé le plus rigoureusement possible les différents modules et leur environnement sous APC (ALCYONE+PLEIADES+COMFIE), nous obtenons les résultats sous forme synthétique et complète (cf. Figure 52). Ainsi, premièrement nous avons comparé les modules modélisés entre eux, avant de les confronter aux modules réels.

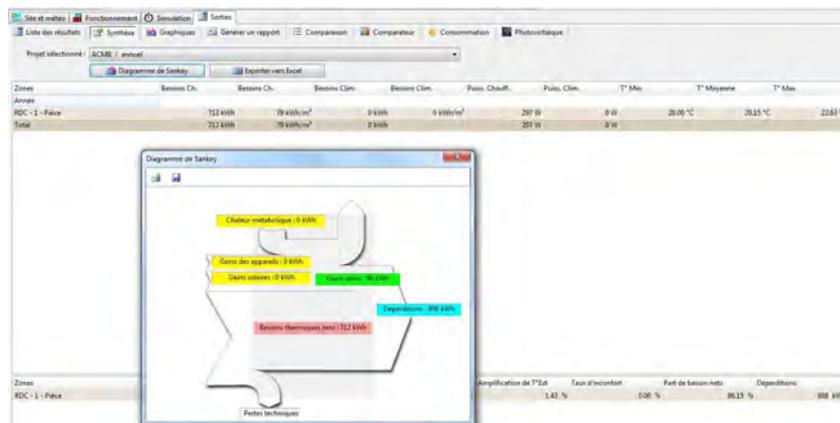


Figure 52 : Ecran de présentation des résultats sous PLEIADES + COMFIE

3.2. Besoin de chauffage / Puissance de chauffe

Les graphiques suivants présentent les besoins de chauffage (cf. Figure 53) ainsi que la puissance de chauffe (Figure 54) nécessaire pour chaque module :

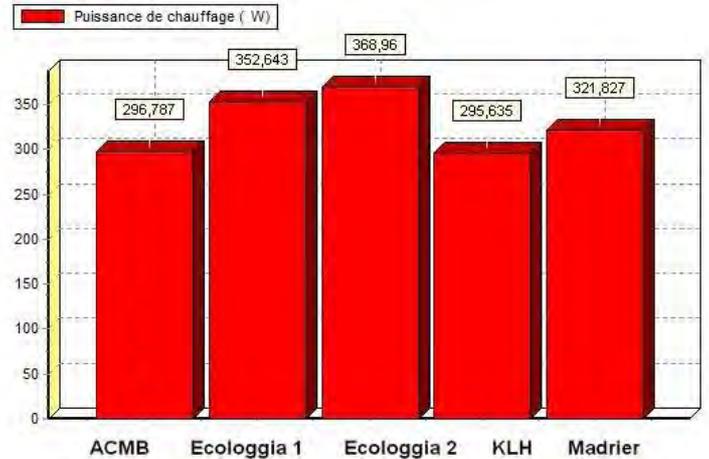
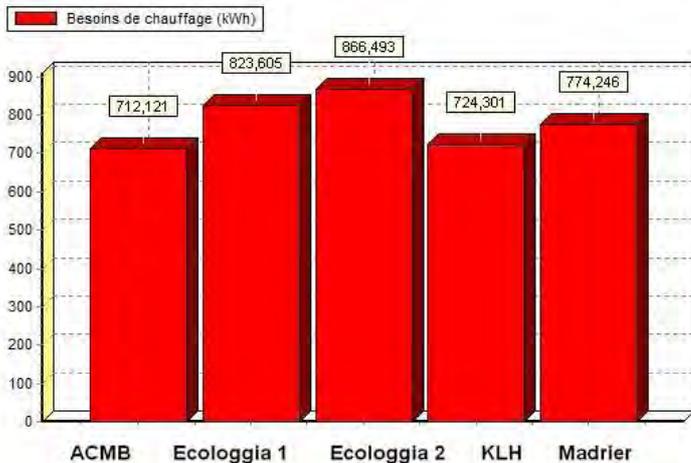


Figure 53 : besoin de chauffage par module Figure 54 : Puissance de chauffage nécessaire par module

Ces graphiques montrent donc qu'avec les paramètres de modélisation qui ont été choisis, le module ACMB est celui qui possède les besoins de chauffage et donc la puissance de chauffe (car tous les modules ont la même géométrie) la plus faible (712 kWh // 297W), il a donc la meilleure performance énergétique. Il est 20% plus performant que le module Ecologgia 2. Ce module, Ecologgia 2, est le moins performant (866 kWh // 367W). Globalement, les modules ayant du bois massif dans leur paroi, sont les plus performants, seul le module ACMB est meilleur, ensuite les modules ossatures Ecologgia ont des performances 6-9 % inférieures.

Cependant, vis-à-vis des coefficients de transmission surfacique (U)(cf. Figure 55), ces résultats semblent cohérents, c'est d'ailleurs ce qui est illustré dans le graphique Figure 56.

Module	U paroi (W/m ² .K)
ACMB	0,156
Ecologgia 1	0,207
Ecologgia 2	0,232
KLH	0,197
Madrier	0,187

Figure 55 : coefficients de transmission surfacique par module

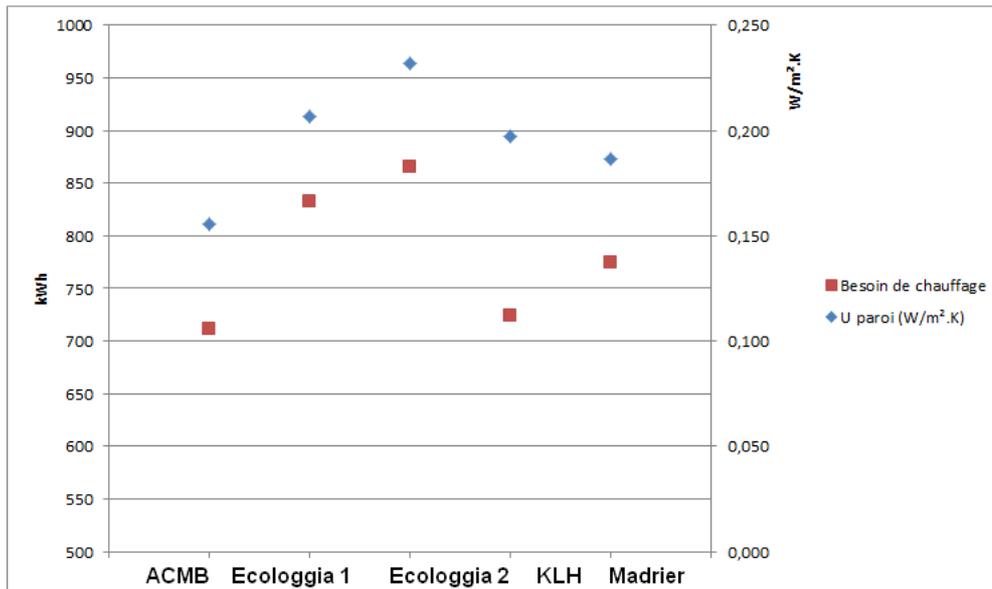


Figure 56 : besoin de chauffage (kWh) et U paroi (W/m².K) pour chaque module

Néanmoins, on remarque que même si le KLH a un U paroi plus élevé que le U paroi madrier, il a des besoins de chauffages inférieurs car ses ponts thermiques (cf. Partie 2 :) sont inférieurs à celui du madrier. De même le module ACMB ayant des ponts thermique élevés, l'avantage de son U paroi inférieur aux autres est grandement atténué.

3.3. Déphasage et amortissement

Les résultats des modélisations fournissent également le déphasage de température entre la température intérieure et la température extérieure des modules. Ce déphasage est illustré sur la Figure 57

Le module KLH possède ainsi le meilleur amortissement (différence entre T° extérieure de pointe et T° intérieure de pointe) de l'ordre de $\Delta T = 10,7^{\circ}\text{C}$ contrairement au module ECOLOGGIA 2 qui lui a un amortissement plus faible ($\Delta T = 9,5^{\circ}\text{C}$).

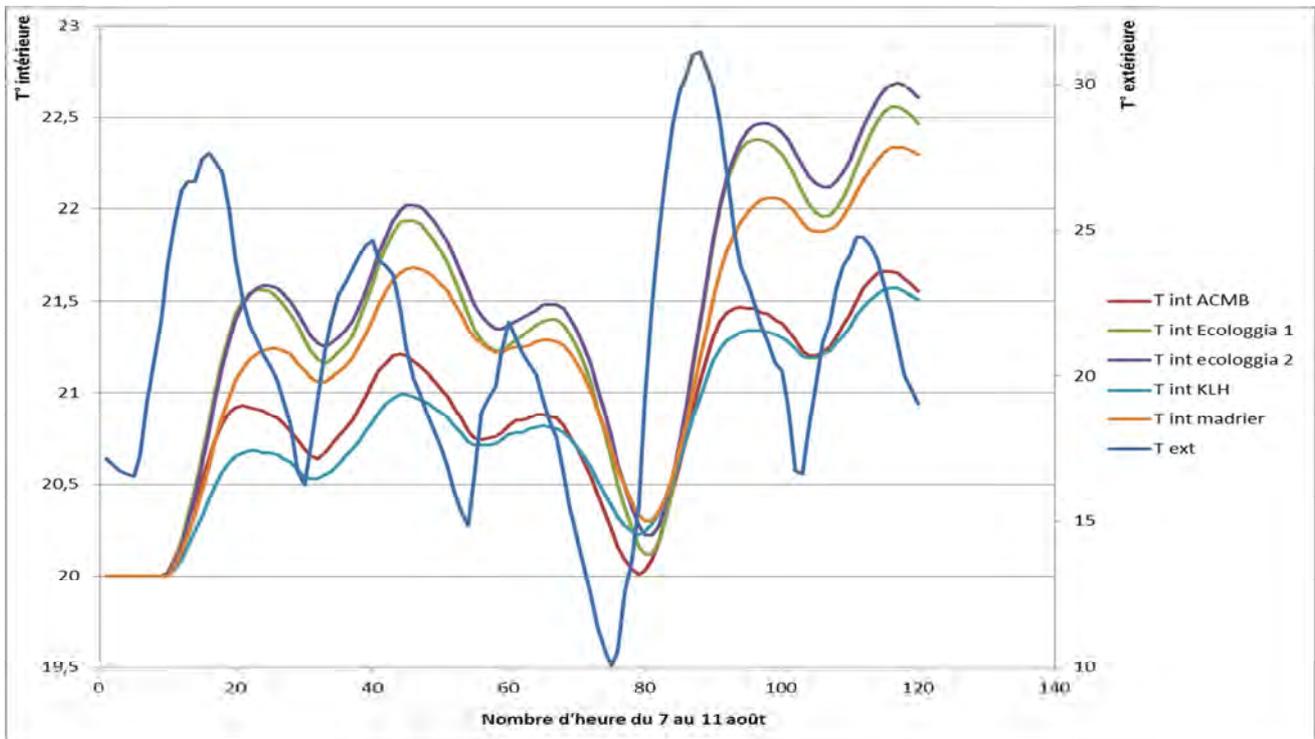


Figure 57 : illustration du déphasage et de l'amortissement dans les modules

Vis-à-vis du déphasage, si l'on considère la grande variation de température extérieure (heure 75 à 88), les modules KLH et ACMB ont des déphasages similaires (+ 6 heures) alors que les trois autres ont un comportement identique avec un déphasage de l'ordre de 9 heures. Ainsi, les modules madrier, ECOLOGGIA 1 & 2 ont une meilleur réponse chronologique vis-à-vis des variations de température mais un amortissement plus faible.

4. CONFRONTATION DES MODELISATIONS AVEC LES MODULES REELS

4.1. Introduction

Après avoir comparé les modélisations des modules entre eux, il faut maintenant comparer ces modélisations avec la réalité des modules. Les différents paramètres qui seront comparés ici sont les besoins totaux de chauffage sur la période du 1 décembre au 5 février, ainsi que les besoins de chauffage durant la semaine la plus chaude et froide durant cette même période. Puis on comparera en dynamique la puissance de chauffage réelle avec celle modélisée et le pourcentage d'erreur en dynamique vis-à-vis de la température extérieure, le tout sur cette même période du 1 décembre au 5 février.

4.2. Besoin totaux de chauffage sur la période du 1 décembre au 5 février

Le Tableau 21 suivant récapitule tous les résultats sur les besoins totaux de chauffage sur la période du 1^{er} décembre 2011 au 5 février 2012 au niveau des modules réels et des modélisations.

Tableau 21 : Récapitulatif des besoins de chauffage (kWh) du 1^{er} décembre au 5 février

puissance armoire (W)	14,76				
energie armoire (kWh)	23,35032				
Besoin chauffage (kWh)	ACMB	Ecologia 1	Ecologia 2	KLH	Madrier
Modélisation	243,335	285,986	302,288	252,099	269,136
Réel	212,88	249,69	236,91	221,24	221,10
erreur	-14,30%	-14,53%	-27,60%	-13,95%	-21,73%

On remarque que les besoins de chauffage modélisés sont supérieurs aux besoins réels, et ce pour tous les modules. Le pourcentage d'erreur entre la modélisation et le réel est de -18,42% ce qui équivaut à environ 40 kWh sur l'année entière. Cette surestimation des besoins de chauffage s'explique par une sous-estimation des propriétés des matériaux bois.

4.3. Besoin de chauffage sur la semaine la plus chaude/la plus froide sur cette même période.

Afin de vérifier si les pourcentages d'erreur présentés ci-dessus étaient constant ou non sur la période entière, ce qui aurait pu laisser croire à un oubli de modélisation, nous avons vérifié si ces pourcentages étaient constant dans des périodes de température les plus distinctes possibles. Les résultats sont présentés dans le Tableau 22 qui suit :

Tableau 22 : Récapitulatif des besoins de chauffage (kWh) sur la semaine la plus chaude/la plus froide

	ACMB	Ecologia 1	Ecologia 2	KLH	Madrier
semaine la plus froide (30jan-5fev)					
Modélisée	42,759	50,538	53,497	44,487	47,413
Réelle	36,29	42,70	40,33	36,69	38,75
% erreur	17,8%	18,3%	32,6%	21,2%	22,3%
semaine la plus chaude (1dec-7dec)					
Modélisée	21,782	25,395	26,815	22,488	24,038
Réelle	20,32	23,38	22,66	20,98	20,85
% erreur	7,2%	8,6%	18,4%	7,2%	15,3%

Les résultats montrent donc qu'une tendance se dégage, plus la température extérieure est élevée, plus le pourcentage d'erreur est faible, et inversement. On en conclut donc que cette variation entre la modélisation n'est pas due à une source constante telle une puissance dissipée par un appareil (humidificateur par exemple) que l'on pourrait avoir oubliée ou alors cette puissance est négligeable.

4.4. Comparaison dynamique pourcentage d'erreur / Température extérieure

Après s'être intéressé à la période où nous avons des données météorologiques fiables, puis à la semaine la plus chaude/la plus froide, nous nous intéressons maintenant à la comparaison dynamique entre le pourcentage d'erreur et la température extérieure afin d'observer si ces erreurs sont fonction des brusques variations de la température. Cette comparaison est réalisée pour le module ECOLOGGIA 1 et KLH et est illustrée dans la Figure 58 et la Figure 59

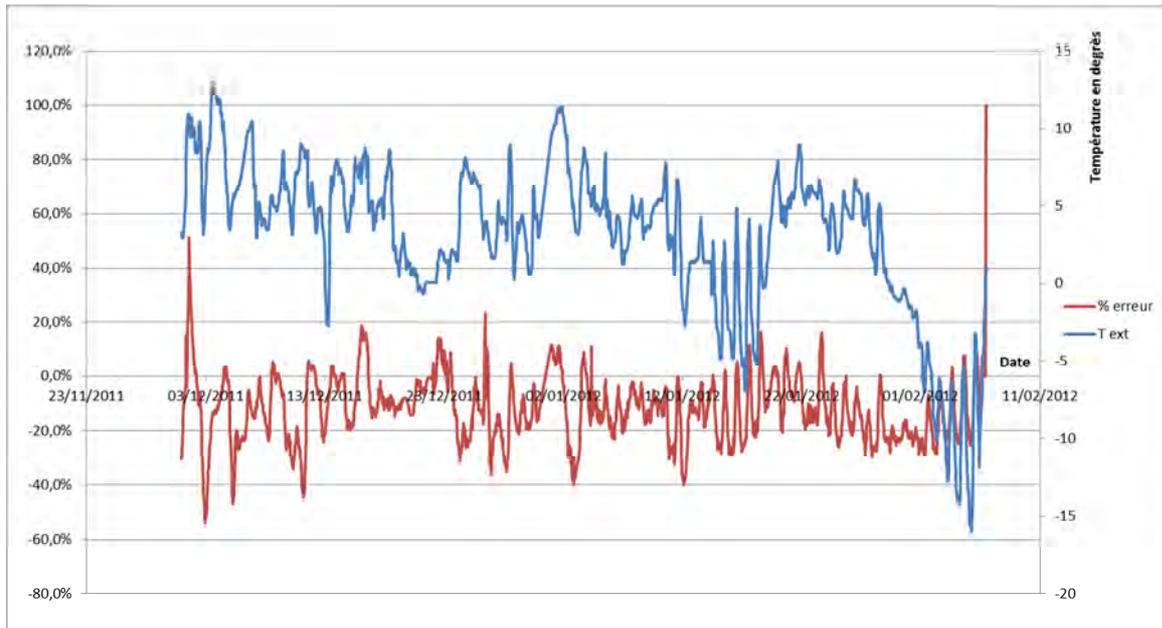


Figure 58 : Comparaison de la température extérieure et du pourcentage d'erreur pour le module ecologia 1

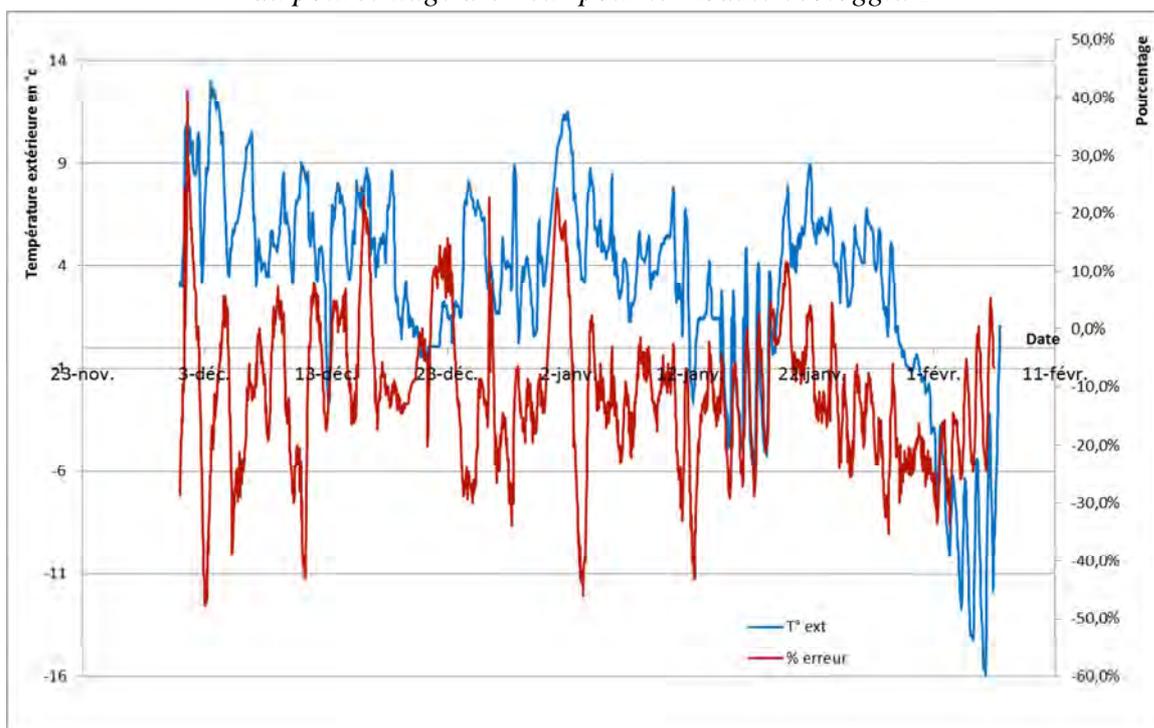


Figure 59 : Comparaison de la température extérieure et du pourcentage d'erreur pour le module KLH

Ces deux figures montrent clairement que la brusque variation de la température extérieure entraîne une augmentation brusque du pourcentage d'erreur. Ainsi d'après ces graphiques, on voit que l'erreur n'est pas une constante, mais évolue en fonction de la modification des paramètres extérieurs. Ce résultat conforte celui énoncé précédemment. Il est peu probable que la surestimation des besoins de chauffage de PLEIADES provienne d'une quelconque erreur dans la valeur de la puissance dissipée réelle (si c'était le cas, il ne pourrait y avoir de pourcentage d'erreur nul comme c'est le cas ici).

4.5. Comparaison dynamique puissance réelle / puissance modélisée

Enfin, nous avons étudié la comparaison dynamique entre la puissance réelle de chauffage et celle modélisée par PLEIADES (Figure 60), cela afin de mettre en évidence le décalage temporel entre la modélisation et le réel. La modélisation réagit plus rapidement que la réalité (environ 10 heures). On y observe également le même phénomène que vu ci-dessus (4.3, 4.4) qui est que l'erreur entre la modélisation et la réalité n'est pas systématique (les deux courbes se superposent par endroit et pas à d'autres (en ayant supprimé le décalage)).

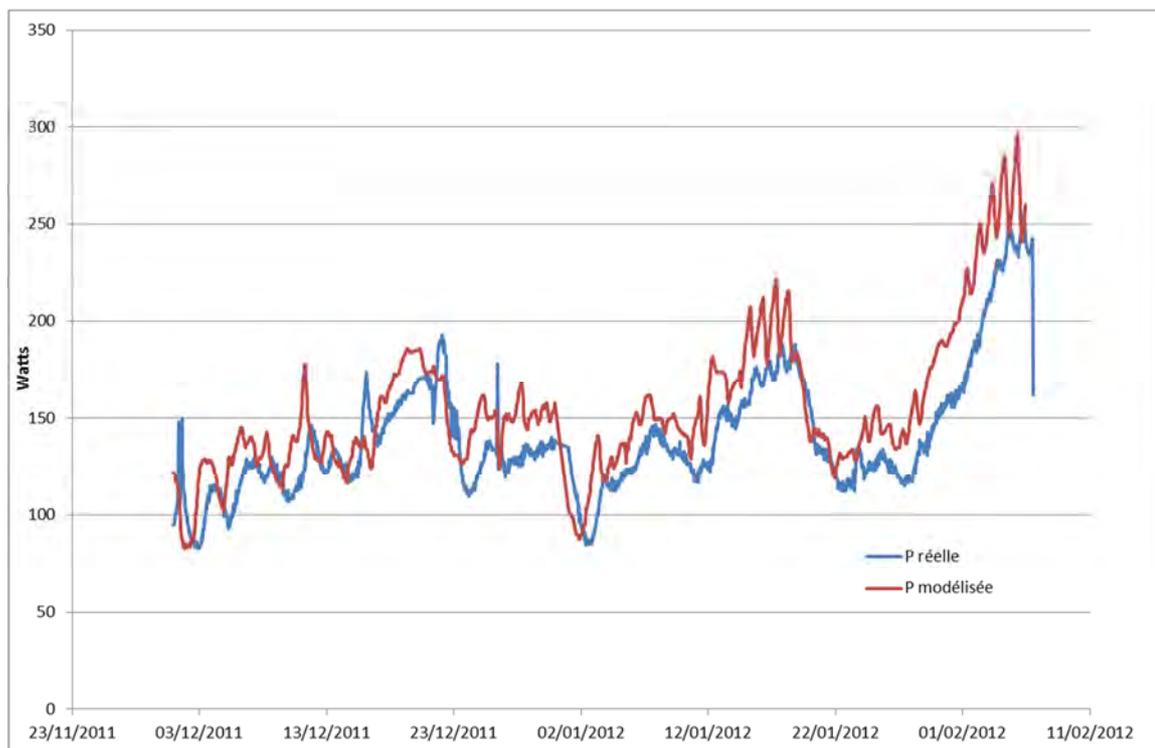


Figure 60 : Comparaison entre la puissance réelle et celle modélisée (besoin de chauffage)

CONCLUSION

Tout d'abord, afin d'obtenir des résultats les plus fiables possibles, nous nous sommes efforcés d'optimiser au maximum la modélisation des modules sous ALCYONE+PLEIADES+COMFIE. Pour cela, tous les matériaux renseignés l'ont été grâce aux données fournies par les différents constructeurs des modules, le fichier météo a été retravaillé pour supprimer les données erronées (capteur défectueux, ouverture de porte...). De même, tous les ponts thermiques ont été modélisés sous THERM.

C'est donc avec cette modélisation optimisée des modules que nous avons lancé les simulations afin de comparer les résultats modélisés aux valeurs obtenues grâce aux différents capteurs placés dans chaque module. Une première comparaison des différentes modélisations entre elles a été réalisée. Dans cette comparaison, le module ACMB s'est révélé être le plus performant énergétiquement devant le KLH puis le madrier et enfin respectivement ECOLOGGIA 1 et 2. De même, ce sont les modules ACMB et KLH qui possèdent les meilleurs amortissements thermiques. Par contre, les modules ECOLOGGIA 1 et 2 ainsi que Madrier ont un déphasage plus performant (de l'ordre de 9 heures).

Ensuite, les modélisations ont été confrontées aux modules réels. Il ressort de cette confrontation que les modélisations de PLEIADES surestiment les besoins de chauffage des modules. Cette surestimation est de l'ordre de 18% (détails dans le Tableau 23).

Tableau 23 : Différence entre réalité et modélisation de la consommation de chauffage pour chaque module

ACMB	Ecologia 1	Ecologia 2	KLH	Madrier
-14,30%	-14,53%	-27,60%	-13,95%	-21,73%

D'après les comparaisons dynamiques effectuées entre les besoins de chauffage modélisés et la réalité, cette surestimation n'est pas due à une source de puissance constante qui aurait été oubliée dans la modélisation. **Cette surestimation provient donc d'une mauvaise appréciation par la modélisation et donc du logiciel PLEIADES des propriétés des matériaux bois.** Cette conclusion doit être abordée avec beaucoup de recul. Nous allons d'abord exposer les points qui pourraient contredire cette conclusion et nous montrerons ensuite nos hypothèses renforçant cette conclusion :

Tout d'abord, nous avons démontré qu'environ 1/3 des flux totaux dans les modules étaient imputables aux ponts thermiques. Or ces ponts thermiques ont été modélisés sous THERM et cette modélisation en éléments finis n'est pas parfaite et engendre une erreur (2 à 3%). Il est donc nécessaire de vérifier les valeurs de ces ponts thermiques avec d'autres moyens (théoriques et pratiques) pour valider cet aspect de la modélisation. De part ce fait, et en ajoutant la part des planchers et plafonds, le flux passant par les parois ne représente plus que 50% du flux total. De même que pour les ponts thermiques, une étude approfondie de tous les organes entraînant un flux autre qu'à travers les parois doit être réalisé afin de quantifier de manière certaine ces différents flux. Cela permettrait obtenir la part réelle du

flux passant par les parois. Qui plus est, le rayonnement solaire diffus n'a pas été mesuré directement mais a dû être estimé, ce qui engendre une erreur supplémentaire possible.

Mais certaines des hypothèses que nous avons prises accentuent quant à elles l'écart entre la modélisation et la réalité. Les modules ont été définis comme parfaitement étanches à l'air, ce qui n'est pas réellement le cas. Or le transfert de chaleur est lié à l'étanchéité à l'air des bâtiments. Les ponts thermiques linéiques autour de la porte ainsi que ceux ponctuels dans les angles du bâtiment n'ont pas été pris en compte (limites du logiciel THERM et paramètres trop imprécis pour effectuer une modélisation cohérente). Enfin, la puissance dissipée par l'armoire électrique a été prise pour sa valeur la plus défavorable (certains compteurs inactifs, totalité de la puissance dissipée en chaleur).

Pour conclure, nous estimons une certaine cohérence dans l'ensemble des paramètres pris en compte pour arriver à la conclusion que la modélisation thermique sous PLEIADES est défavorable pour les constructions bois, avec une surestimation de la consommation de chauffage de l'ordre de 18%

BIBLIOGRAPHIE

- [1] JANNOT, Yves. *Cours Thermique Solaire*. Mars 2011. Disponible sur <http://www.thermique55.com/principal/thermiquesolaire.pdf> [Consulté le 10/12/2011]
- [2] BESSEMOULIN, Pierre et OLIVIERI, Jean. *Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette*. La Météorologie 8e série. Septembre 2000, n° 31. Disponible sur <http://www.smf.asso.fr/Ressources/Bessemoulinbis31.pdf> [Consulté le 5/02/2012]
- [3] GERARDO, Andres Vieyra Reyes. *Alternativas de comercializacion para pequenos medios de generacion en sistemas interconectados* [en ligne]. Mémoire d'ingénieur civil électricien. Universidad de Chile Facultad de ciencias fisicas y matematicas, 2008. p. 24-25. Disponible sur http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2008/vieyra_gr/sources/vieyra_gr.pdf [Consulté le 5/02/2012]
- [4] CSTB. *Règles TH-U*. 28/03/2008
- [5] AFNOR. *Pont thermiques dans les bâtiments – Calcul des flux thermiques et des températures superficielles - Partie 1 : méthodes générales de calcul*. NF EN ISO 10211-1, novembre 1995.
- [6] AFNOR. *Pont thermiques dans les bâtiments – Calcul des flux thermiques et des températures superficielles - Partie 2 : ponts thermiques linéaires*. NF EN ISO 10211-2, novembre 2002.
- [7] KOLB, Josef. *Bois, systèmes constructif*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010, 319 p.
- [8] CNDB. *Systèmes constructifs* [en ligne]. Disponible sur http://www.cndb.org/?p=systemes_constructifs [consulté le 4/02/2011]
- [9] Bâtissez bois, le blog de la construction bois- *Les modes constructifs des bâtiments en bois* [en ligne]. Dossier publié le 1 septembre 2010. Disponible sur <http://www.batissezbois.com/index.php/batiment-bois/construction-bois-ossature-bois/le-bois-et-ses-modes-constructifs/> [consulté le 5/02/2011]
- [10] FINDER, *Compteurs d'énergie* [en ligne]. Disponible sur <http://gfinder.findernet.com//assets/Series/66/S7EFR.pdf> [consulté le 06/02/2012]
- [11] WINDOWS LBL, logiciel freeware *THERM*, téléchargeable à l'adresse suivante : <http://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html> [consulté le 15 janvier 2012].

RESUMÉ

Le développement de l'importance à la fois de la performance énergétique et de l'empreinte environnementale dans le domaine du bâtiment ouvre de belles perspectives pour la construction bois. Cependant, les phénomènes physiques de transfert couplés de masse et de chaleur dans les parois de bâtiments en bois ne sont pas totalement maîtrisés. Le projet TRANSBATIBOIS (TRANSferts dans les parois de BATiments en BOIS) a été développé pour travailler cette problématique. Celui-ci étudie le comportement de différentes solutions de constructions en bois. Des bâtiments et des parois expérimentales ont été équipés d'instruments de mesure afin d'en suivre le comportement lorsque ceux-ci sont soumis à des climats intérieurs ou extérieurs variables. Sur le site de l'ENSTIB à Epinal, cinq modules expérimentaux de 9 m² ont été construits et instrumentés : trois ossatures-bois, un KLH et un madrier.

C'est sur les campagnes de mesure de ces modules que s'inscrit notre projet de fin d'étude. L'objectif de celui-ci est de participer à l'exploitation des données obtenues et de vérifier que les résultats reflètent bien les phénomènes physiques attendus. Pour cela, une modélisation des modules a été effectuée sous PLEIADES, un logiciel commercial de simulation thermique de bâtiments. Les résultats théoriques obtenus ont ensuite été comparés aux relevés réels, pour analyser les différences entre les modélisations et les cas réels.

Mots clés: TRANSBATIBOIS, PLEIADES, modélisation thermique, transfert de chaleur, mesures modules

ABSTRACT

The development of the importance of both energetic performance and environmental footprint in the building industry opens new prospects in wood construction. Nevertheless, physical phenomena of coupled mass and heat transfer in wood buildings' walls are not totally mastered yet. The TRANSBATIBOIS project (transfer in wood buildings' walls) has been developed to work on this problem. It studies the behavior of different kinds of wood constructions. Experimental buildings and walls have been fitted with measuring instruments in order to follow their behavior when they are under changeable interior and exterior climates. On the Enstib's campus in Epinal, five experimental modules of 9 m² have been build and equipped: three stick frames, one KLH and one log cabin.

It's on those measurement campaigns that our final year project is based. Its aim was to participate in the exploitation of the data obtained in order to check whether the results are consistent with the expected physical phenomena. To do this, modeling of modules has been made on "PLEIADES", a commercial software for building heating modeling. The theoretical results obtained were compared with real readings, to analyse differences between modeling and reality.

Keywords: TRANSBATIBOIS, PLEIADES, heat modelling, heat transfert, measurement, module.

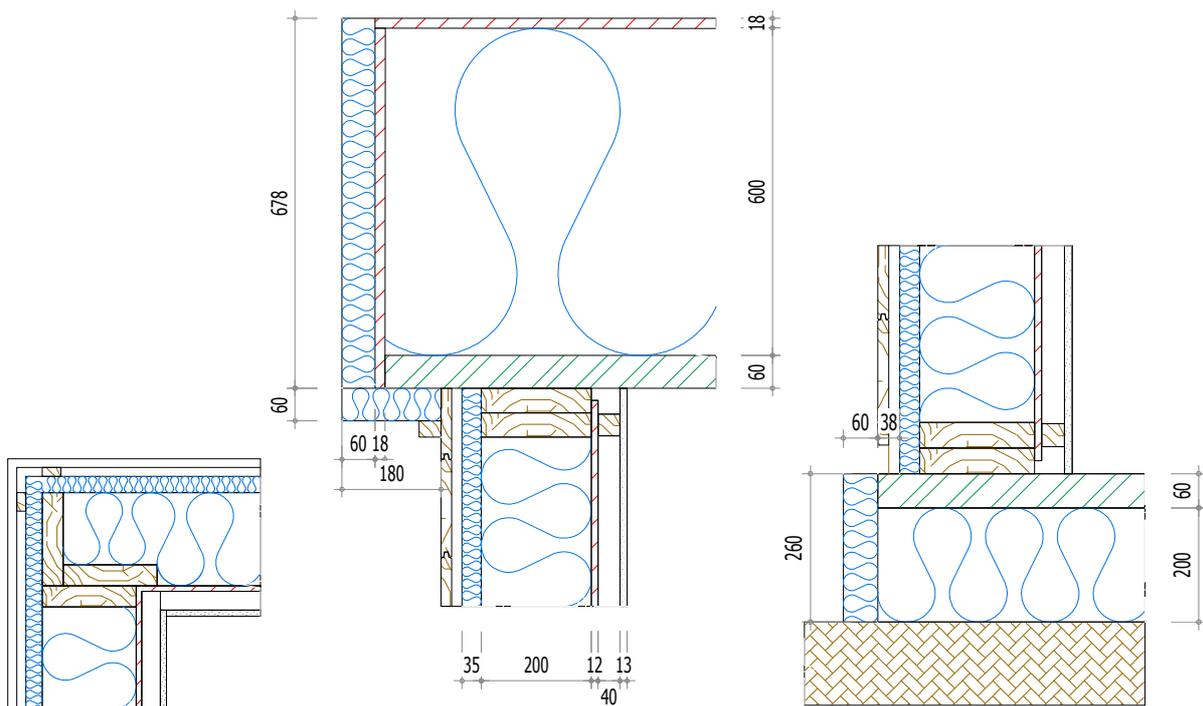
ANNEXE 1 : PONTS THERMIQUES

1. PRESENTATION

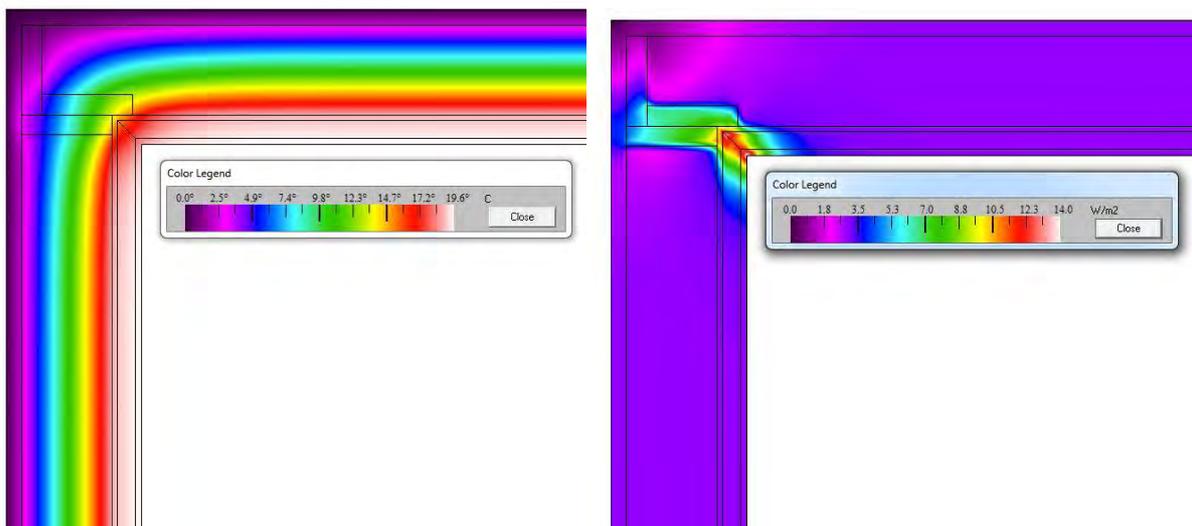
L'ensemble des figures présentées ci-dessous sont les définitions géométriques et les résultats graphiques des ponts thermiques de tous les modules présents sur le site de l'ENSTIB. La modélisation éléments finis a été effectuée sous le logiciel THERM.

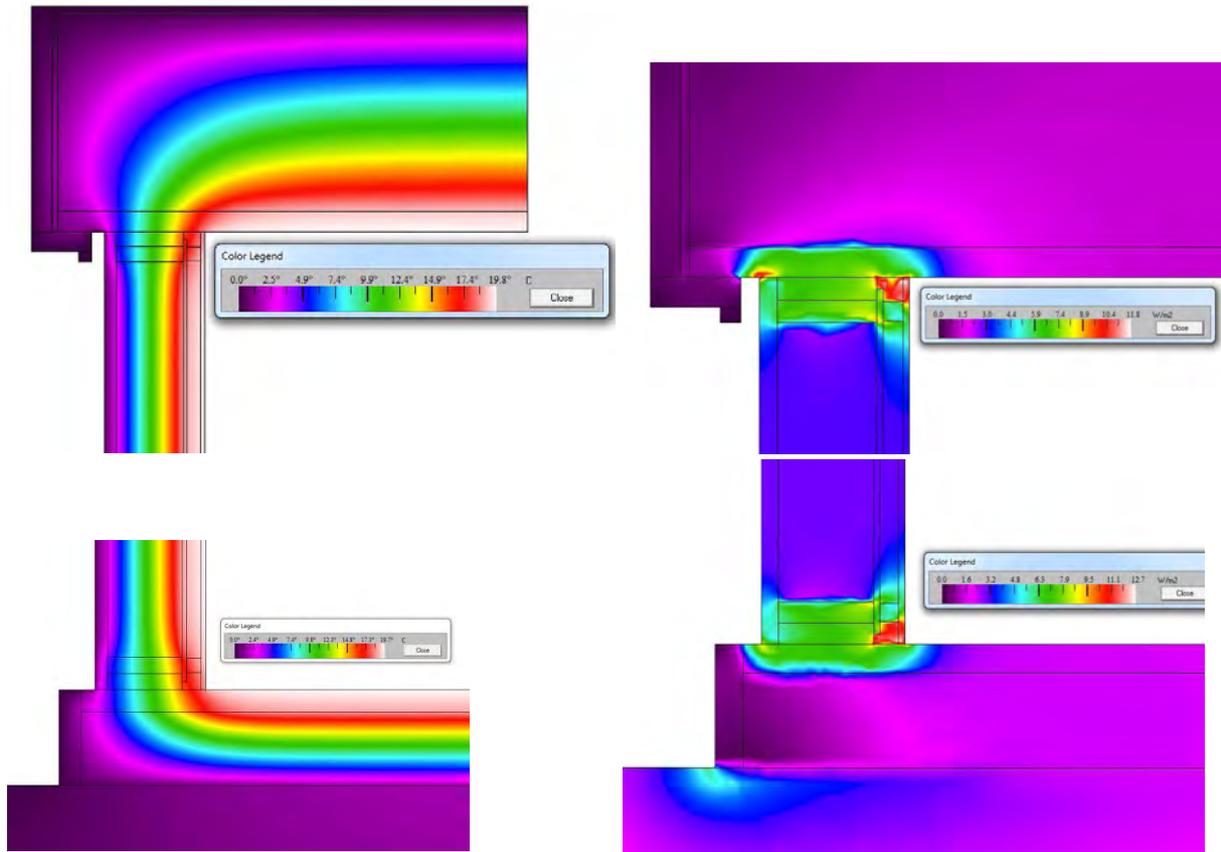
2. MODULE ACMB

2.1. Définition géométrique



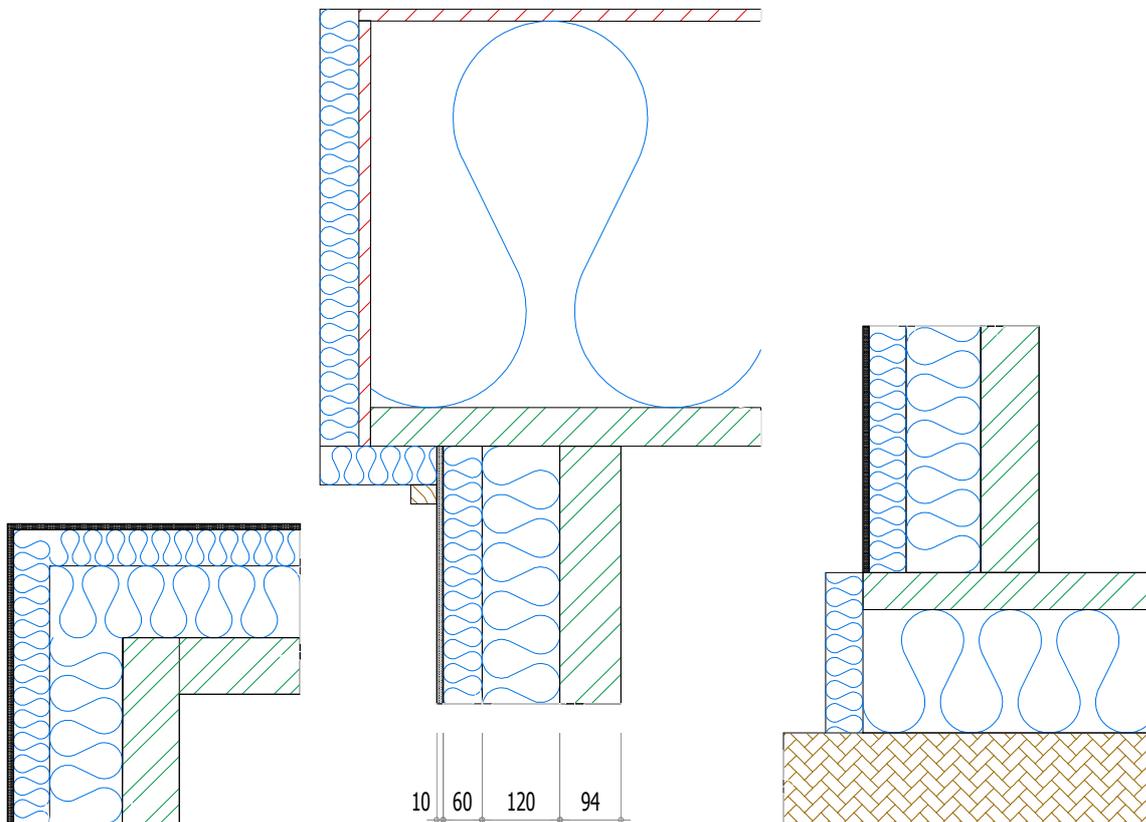
2.2. Résultats THERM



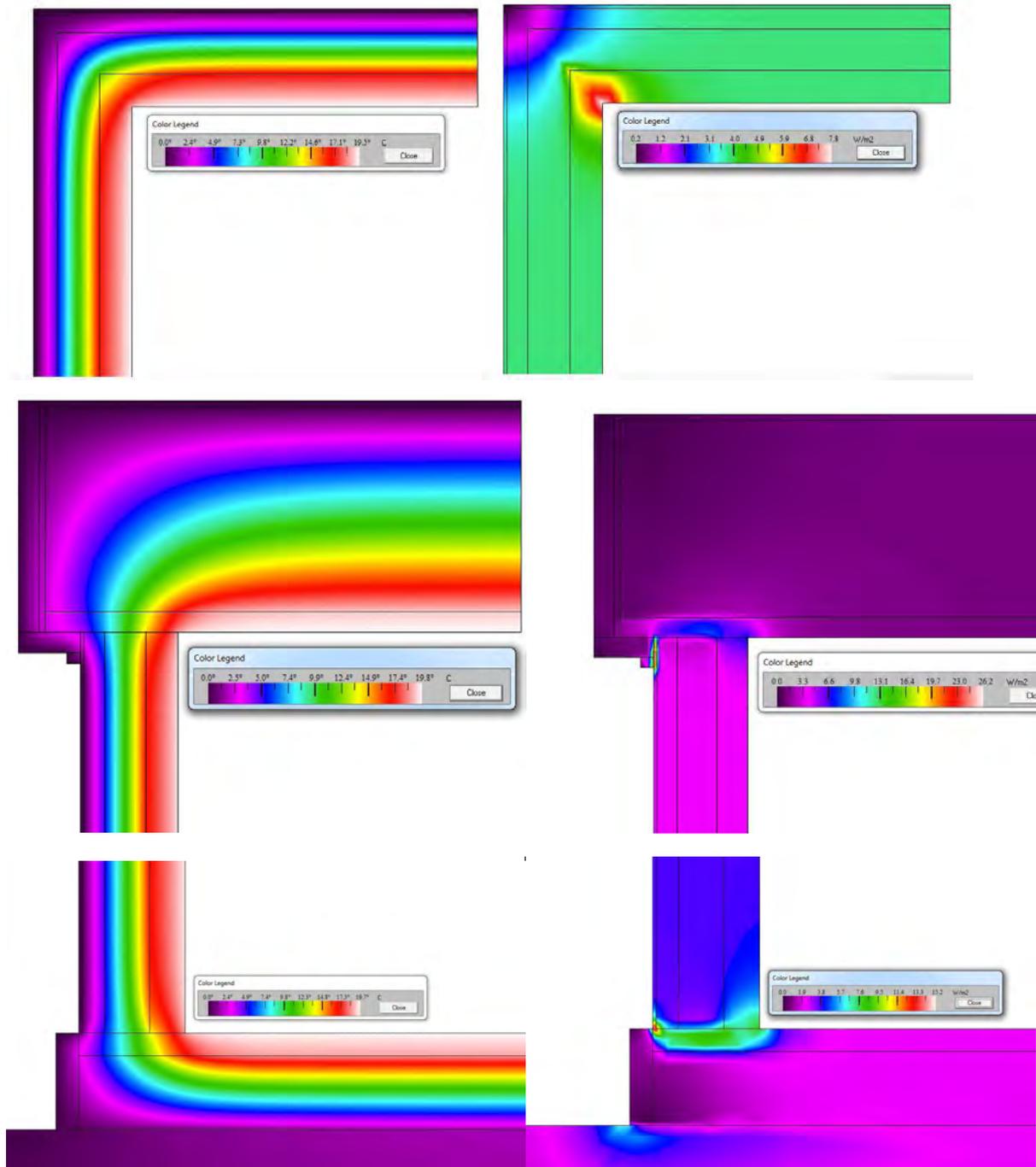


3. MODULE KLH

3.1. Définition géométrique

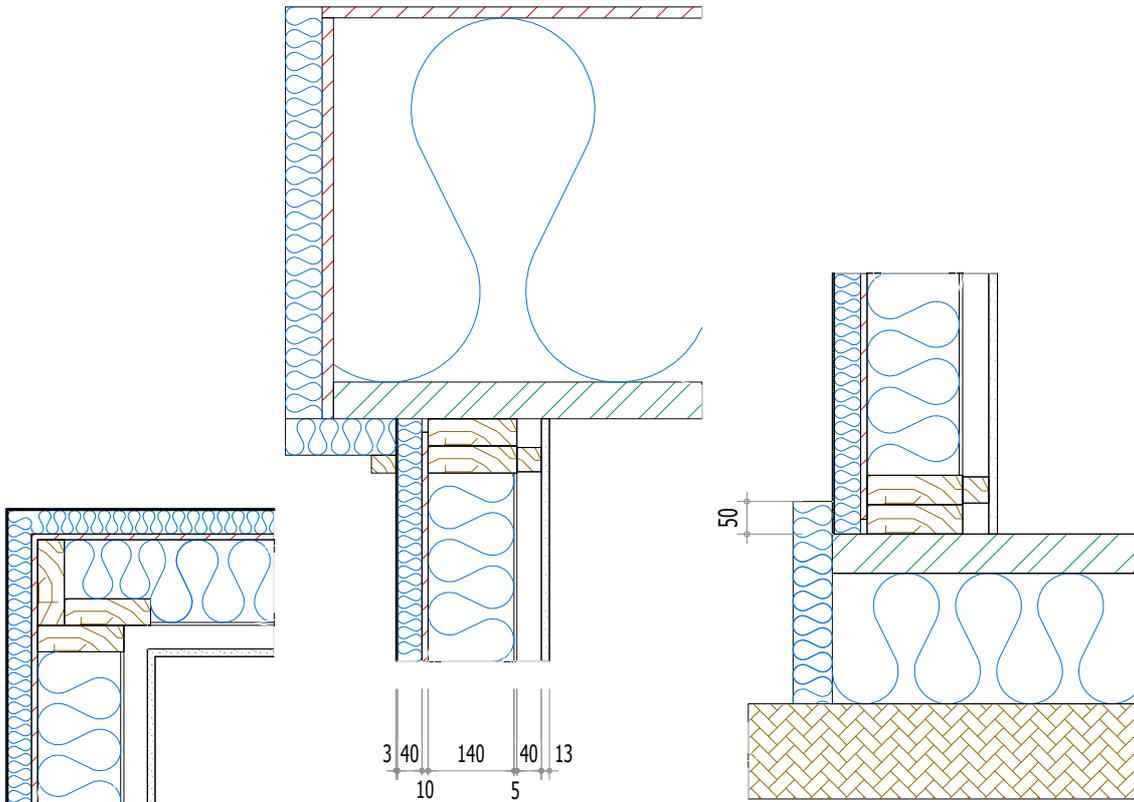


3.2. Résultats THERM

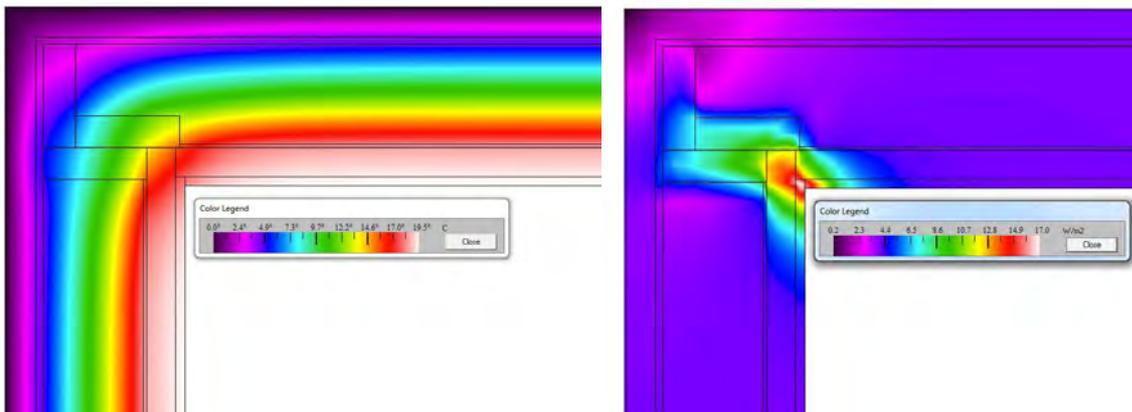


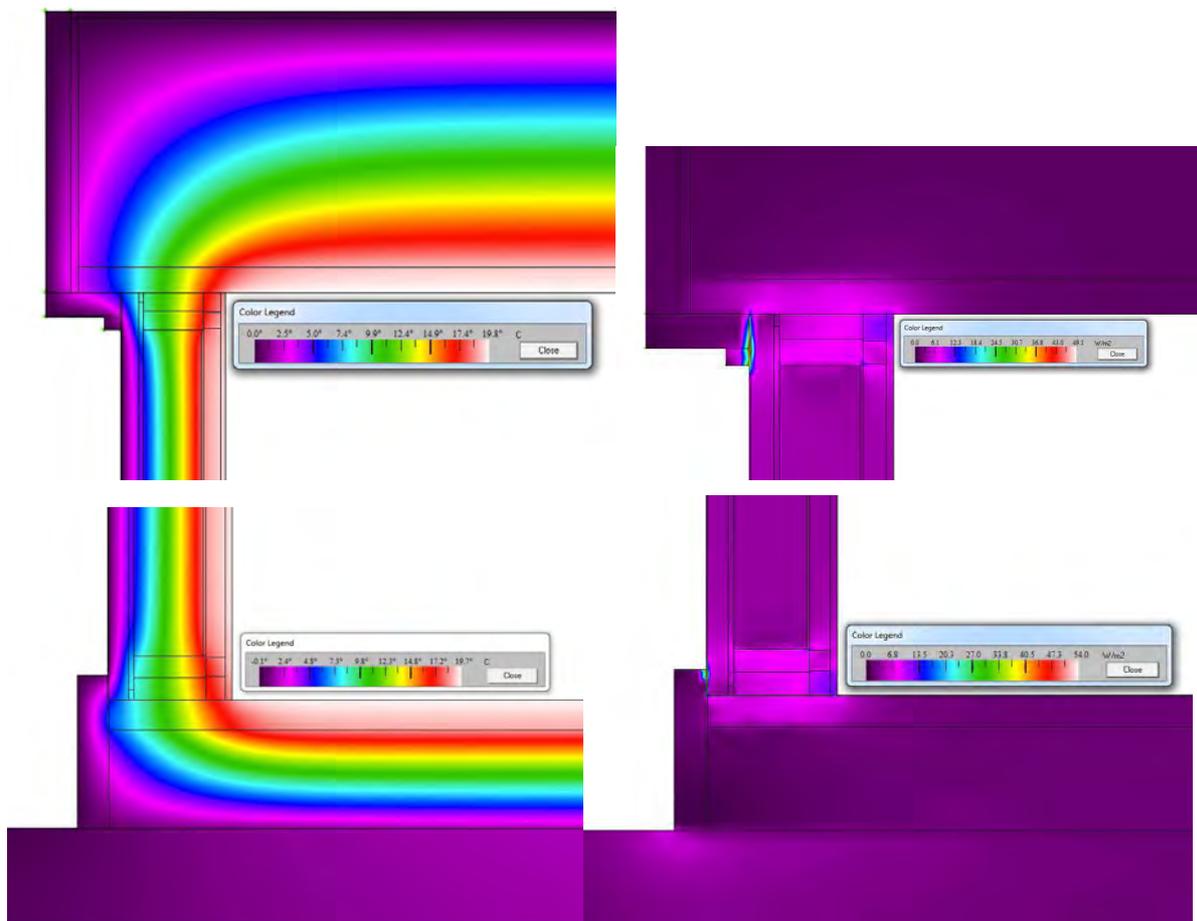
4. MODULE ECOLOGIA 1 ET 2

4.1. Définition géométrique



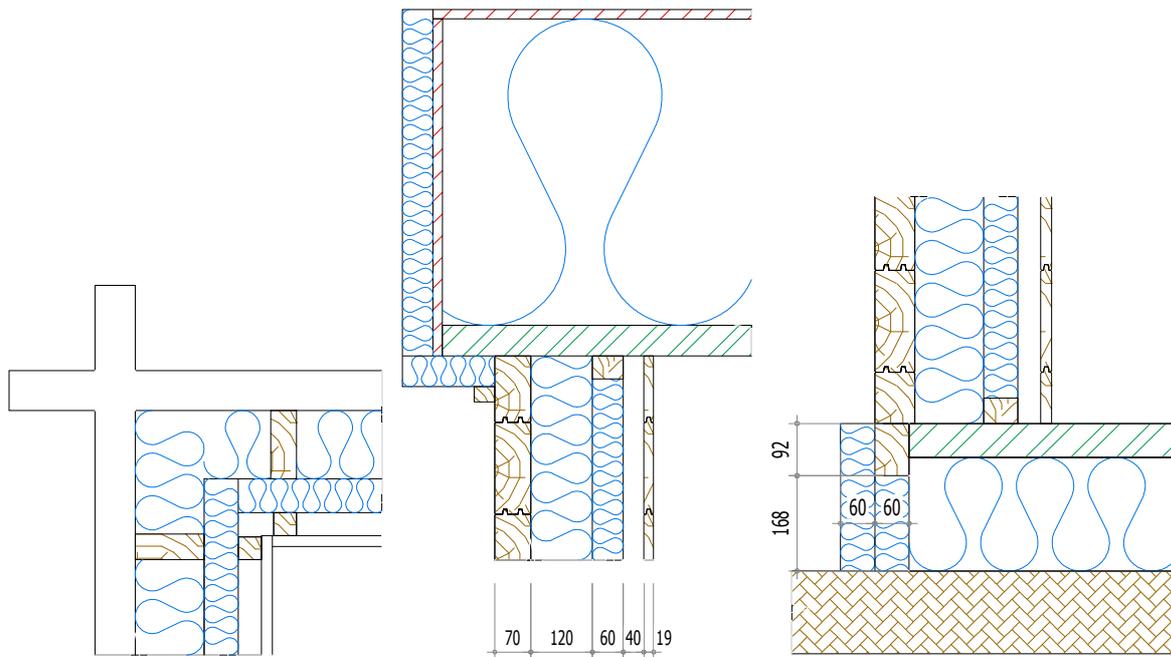
4.2. Résultats THERM



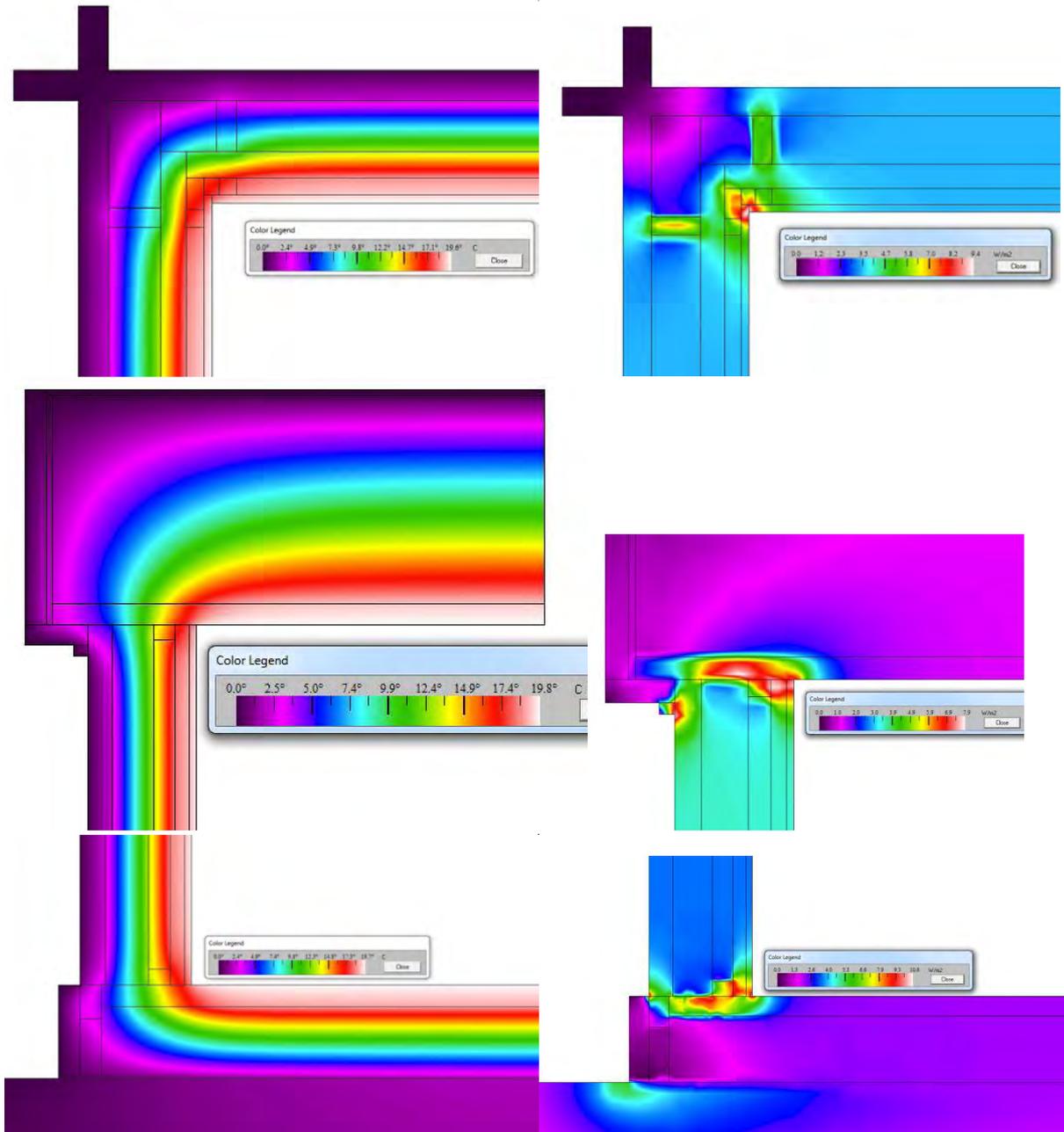


5. MODULE MADRIERS

5.1. Définition géométrique



5.2. Résultats THERM

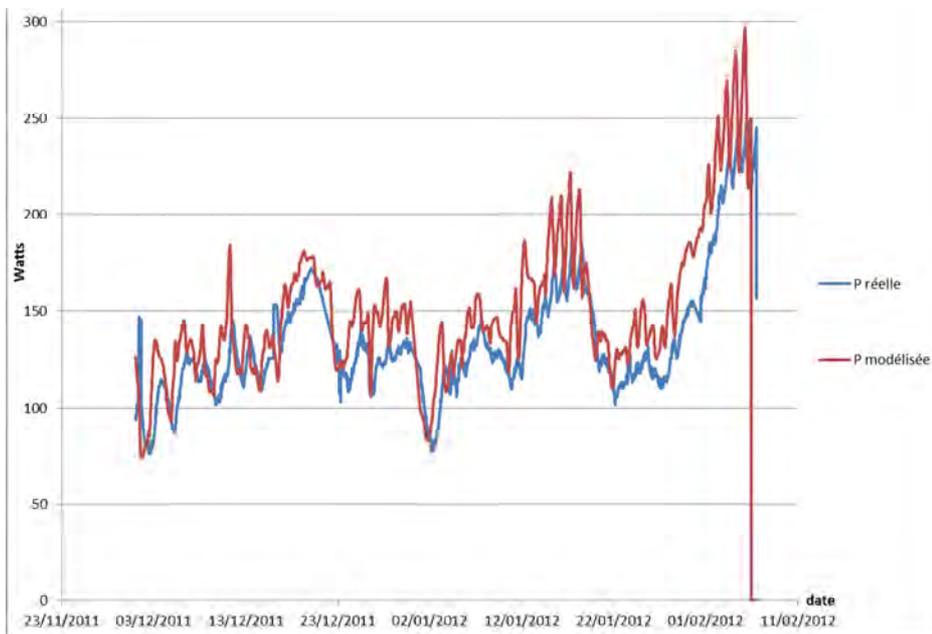


ANNEXE 2: COMPARAISON DYNAMIQUE ENTRE PUISSANCE REELLE ET MODELISEE

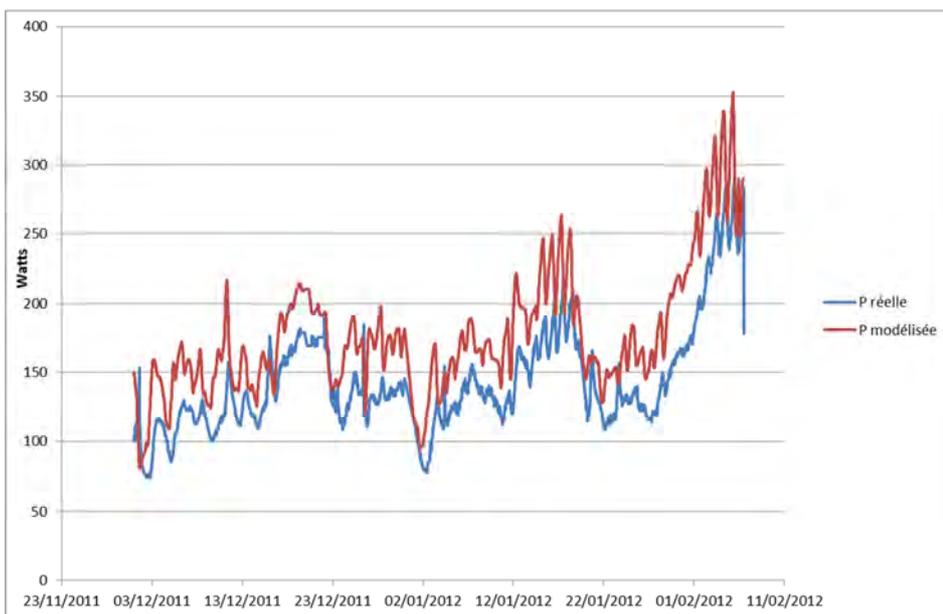
1. PRESENTATION

L'ensemble des graphiques suivants illustrent la comparaison entre la puissance de chauffage réelle et la modélisée pour chaque module. Les conclusions tirées de ces différents graphiques sont exposées en 4.4.

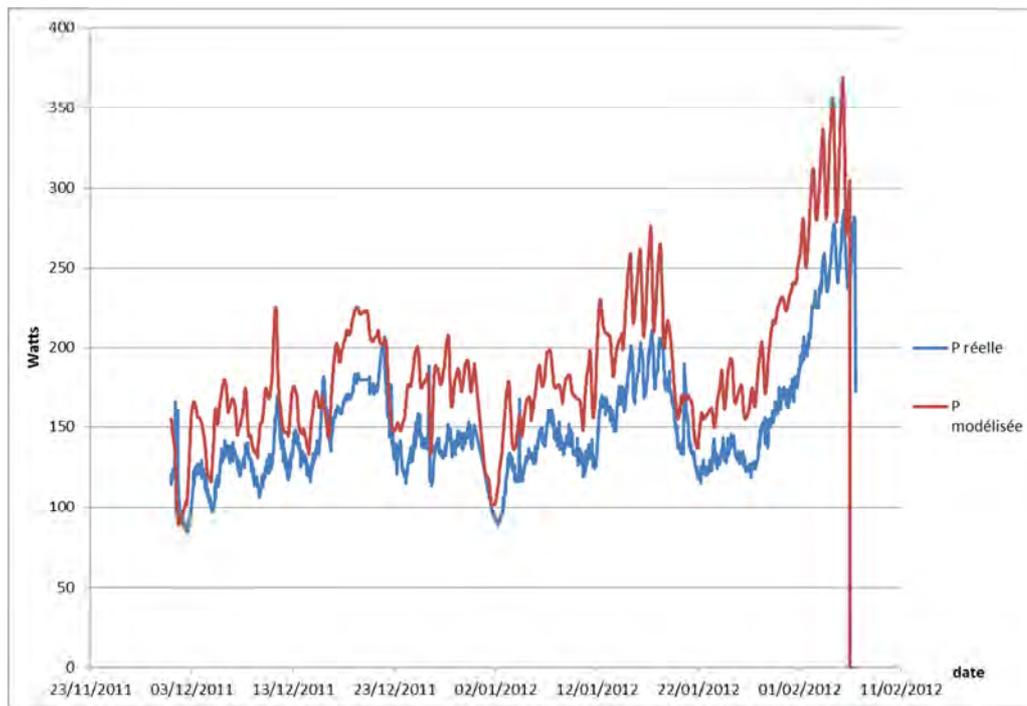
2. MODULE ACMB



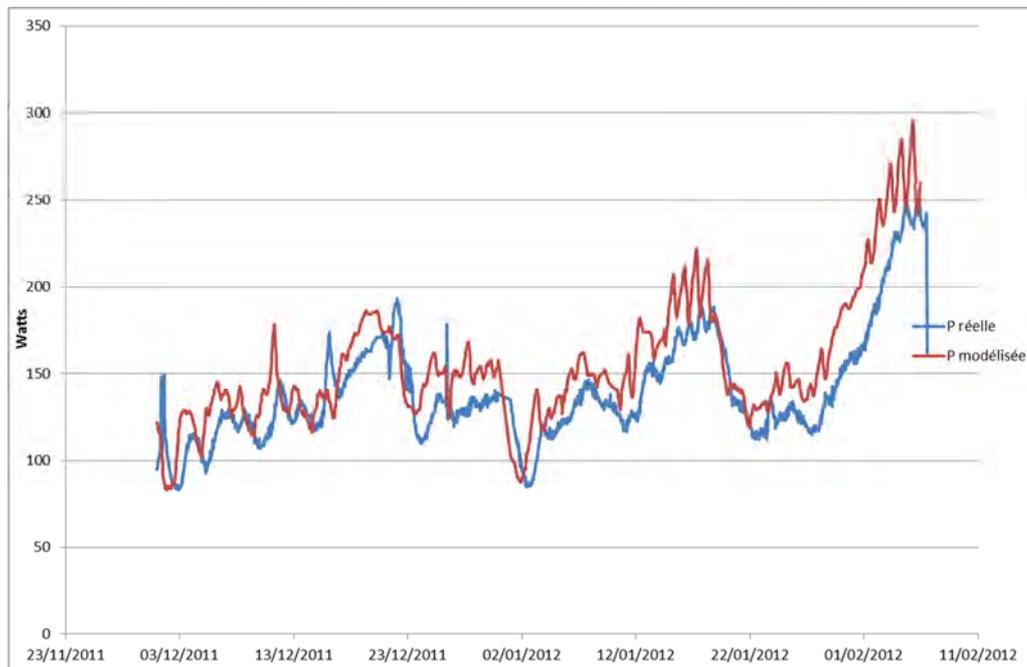
3. MODULE ECOLOGIA 1



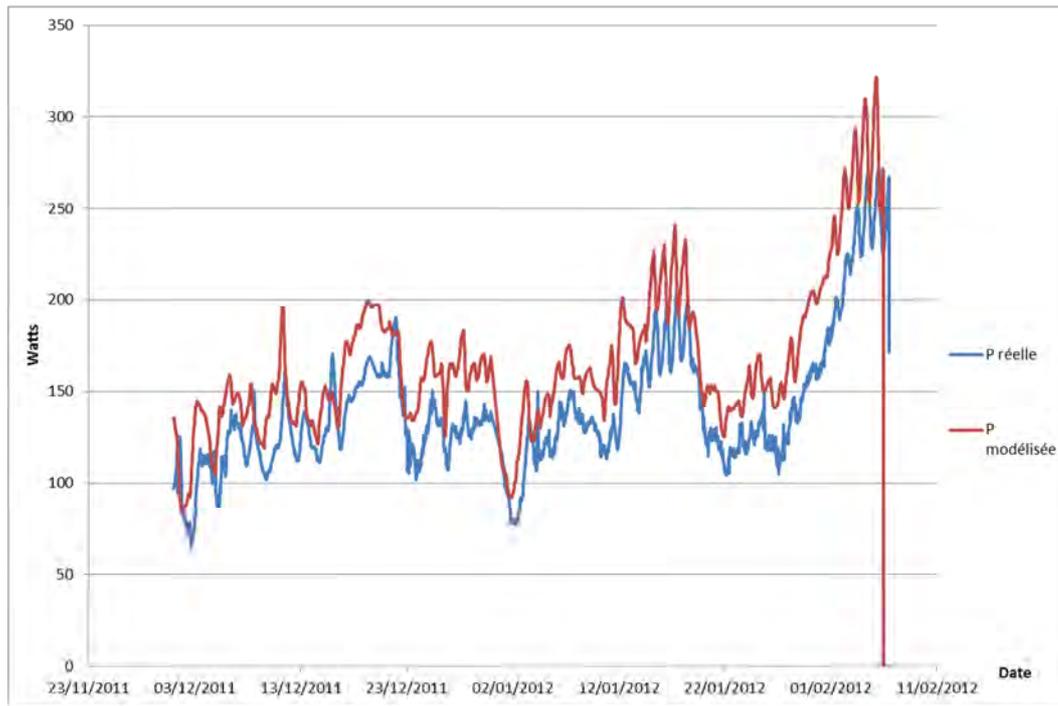
4. MODULE ECOLOGIA 2



5. MODULE KLH



6. MODULE MADRIER



ANNEXE 3 : REPARTITION DES DEPERDITIONS THERMIQUES

Chaque module a été modélisé en stationnaire pour connaître la répartition des déperditions thermiques.

Module ACMB		
composition	déperdition W/K	part des déperditions
plancher haut	0,627	6,8%
plancher bas	0,989	10,7%
porte	0,194	2,1%
ponts thermiques	3,358	36,2%
murs	4,114	44,3%
total	9,282	100,0%



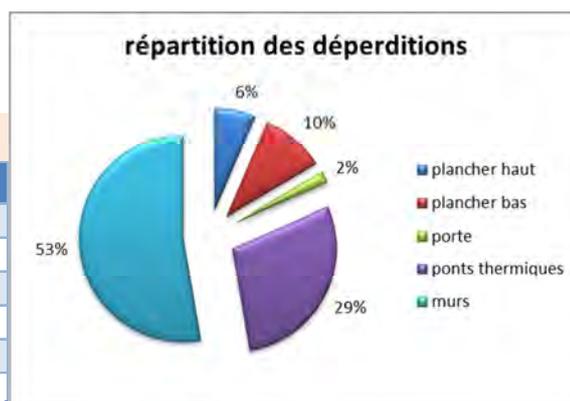
Module Ecologgia 1		
composition	déperdition W/K	part des déperditions
plancher haut	0,627	6,1%
plancher bas	0,989	9,7%
porte	0,194	1,9%
ponts thermiques	3,348	32,7%
murs	5,083	49,6%
total	10,241	100,0%



Module Ecologgia 2		
composition	déperdition W/K	part des déperditions
plancher haut	0,627	6,0%
plancher bas	0,989	9,5%
porte	0,194	1,9%
ponts thermiques	3,346	32,2%
murs	5,225	50,3%
total	10,380	100,0%



Module KLH		
composition	déperdition WK	part des déperditions
plancher haut	0,627	6,4%
plancher bas	0,989	10,0%
porte	0,194	2,0%
ponts thermiques	2,846	28,9%
murs	5,186	52,7%
total	9,842	100,0%



Module Madriers		
composition	déperdition WK	part des déperditions
plancher haut	0,627	6,4%
plancher bas	0,989	10,2%
porte	0,194	2,0%
ponts thermiques	3,067	31,5%
murs	4,853	49,9%
total	9,730	100,0%



En effectuant la moyenne sur les cinq modules, on obtient la répartition suivante :

Moyenne des 5 modules		
composition	déperdition WK	part des déperditions
plancher haut	0,627	6,3%
plancher bas	0,989	10,0%
porte	0,194	2,0%
ponts thermiques	3,193	32,3%
murs	4,892	49,4%
total	9,895	100,0%

