



Coupler rayonnement externe et  
énergétique interne pour simuler le  
comportement thermique dynamique  
d'un parc de bâtiments  
proposé par EDF

Omar SAADI, Mostafa ADNANE, Siyao YU, Waner CHEN,  
Anas El HAMDI, Ismail BALI

Sous l'encadrement de:  
Hassan BOUIA et Gilles PLESSIS  
Ecole Polytechnique

22 Avril 2016

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Enjeux et motivation du travail . . . . .	1
1.2	Objectif . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Flux solaires</b>	<b>3</b>
2.1	Rayonnement direct . . . . .	3
2.2	Rayonnement diffus . . . . .	3
2.3	Objectif et démarche . . . . .	5
2.4	Calcul d'ombrages . . . . .	5
2.5	Conception de l'algorithme de projection . . . . .	7
2.6	Conception de l'algorithme d'intersection . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Modélisation du comportement thermique d'un parc de bâtiments : le modèle détaillé et la réduction de modèle</b>	<b>12</b>
3.1	Introduction . . . . .	12
3.2	Le modèle détaillé . . . . .	13
3.3	La réduction de modèle . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Étude du projet sur Modelica</b>	<b>24</b>
4.1	Description théorique du modèle thermique des bâtiments sur Modelica	24
4.2	Modélisation d'un bâtiment isolé dans son environnement . . . . .	30
4.3	Modélisation d'un parc de deux bâtiments par échange convectif . . .	35
<b>A</b>	<b>Les configurations d'intersection</b>	<b>38</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>41</b>

# Table des figures

2.1	Différentes formes de rayonnement . . . . .	4
2.2	Ombre entre deux bâtiments . . . . .	6
2.3	Ombre entre deux bâtiments à différents moments de la journée . .	7
2.4	Projection d'une paroi rectangulaire sur le plan de la paroi étudiée . .	8
2.5	Fonction de projection d'un point sur une paroi . . . . .	8
2.6	Intersection d'un rectangle et d'un parallélogramme . . . . .	9
2.7	Cas de non intersection . . . . .	10
2.8	Construction de la figure d'intersection . . . . .	11
3.1	Modèle de paroi . . . . .	13
3.2	Modèle d'une couche de matériau . . . . .	14
3.3	Modèle du vitrage . . . . .	17
3.4	Modèle thermique du vitrage . . . . .	17
3.5	Exemple d'un bâtiment . . . . .	18
3.6	La forme de matrice d'état . . . . .	20
3.7	Représentation graphique d'insertion des noeuds de parois . . . . .	20
3.8	Matrice d'adjacence . . . . .	21
4.1	Modélisation d'une couche élémentaire . . . . .	24
4.2	Modélisation d'une couche élémentaire . . . . .	25
4.3	Données pour un mur multicouche . . . . .	26
4.4	Modélisation sur buildSysPro d'un vitrage . . . . .	28
4.5	Modélisation d'un plancher sur BuildSysPro . . . . .	28
4.6	Modélisation d'un bâtiment sur . . . . .	29
4.7	Modèle d'une monocouche . . . . .	31
4.8	Modèle d'une monocouche avec les entrées . . . . .	31
4.9	Température interne de la zone d'air . . . . .	32
4.10	Energie consommée . . . . .	32
4.11	Mdèle monozone . . . . .	33

4.12	Température de la zone d'air . . . . .	34
4.13	Energie consommée par la zone d'air . . . . .	35
4.14	Température de la zone d'air à long terme . . . . .	35
4.15	Température extérieure . . . . .	36
4.16	Modèle des deux bâtiments couplés . . . . .	37

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Enjeux et motivation du travail

La maîtrise de la consommation de l'énergie est un enjeu majeur de la transition énergétique. Or, la consommation énergétique du secteur résidentiel - tertiaire représente près de 45 % de la consommation d'énergie finale et est responsable de 18 % des émissions nationales de gaz à effet de serre.

L'État français s'est engagé à diminuer de 38 % la consommation d'énergie dans les bâtiments existants entre 2006 et 2020. D'où l'apparition de mesures politiques incitatives pour la rénovation des anciens bâtiments et des réglementations thermiques cadrant les nouvelles constructions de bâtiments à basse consommation (BBC). Les BBC sont très sensibles aux sollicitations intermittentes intervenant dans leur bilan énergétique, qu'elles soient externes (ensoleillement, température extérieure) ou internes (apports thermiques dus aux occupants ou aux équipements). Il devient donc incontournable, pour le confort des occupants comme pour dimensionner efficacement des systèmes énergétiques innovants, de mieux évaluer ces sollicitations dont l'ensoleillement constitue une partie majeure. Il est donc nécessaire d'évaluer correctement les fractions de paroi ombragées pour une meilleure prise en compte des flux solaires diffus et directs.

### 1.2 Objectif

Notre objectif est de modéliser le comportement thermique d'un bâti-

ment dans son environnement (quartier, ville, ...). Et ce afin de calculer sa courbe de charge (puissance) et sa consommation puis pouvoir procéder à l'optimisation des systèmes qui l'équipent. en fonction des paramètres du système.

Afin de valider les différentes étapes du calcul, nous allons l'appliquer tout d'abord sur un parc de logements pavillonnaire sous forme de matrice de maisons individuelles régulièrement espacées et de mêmes dimensions. Ensuite, nous procéderons à l'étude énergétique d'un quartier réel pour lequel on dispose de données géométriques et physiques complètes.

# Chapitre 2

## Flux solaires

### 2.1 Rayonnement direct

Pour évaluer les flux solaires arrivant sur les parois des bâtiments, et qui contribuent à son bilan énergétique, le calcul d'ombrages des différentes parois s'avère nécessaire. La paroi est ombragée, soit parce qu'elle ne voit pas le soleil, soit parce qu'elle est masquée par un bâtiment voisin se situant dans le trajet de la lumière. Ce dernier cas est plus intéressant, car les parois ombragées par les masques solaires sont susceptibles de contenir des fractions ensoleillées dont l'apport énergétique est considérable. Le calcul de cet ombrage n'est pas évident, parce qu'il comprend l'étude d'une multiplicité de configurations de projections possibles, c'est cette difficulté primordiale que nous allons traiter dans ce travail de recherche. Notre quête est donc de hiérarchiser ce calcul, suivant plusieurs étapes, le but est d'explicitier une méthode géométrique basé sur une projection parallèle (car les rayons solaires sont parallèles) sur le plan de la paroi réceptrice. Pour ce faire, on commence par étudier l'effet d'un seul bâtiment voisin, après avoir déterminé ses parois responsables de l'ombrage en question, on évalue l'ombrage d'une seule paroi sur la paroi de départ. Ainsi le grand souci est de trouver l'aire de l'intersection de ces deux parois dans le plan de la paroi réceptrice.

### 2.2 Rayonnement diffus

L'énergie du rayonnement solaire qui arrive sur la terre est négligeable devant celle au niveau de l'atmosphère. Toutefois, elle reste très impor-

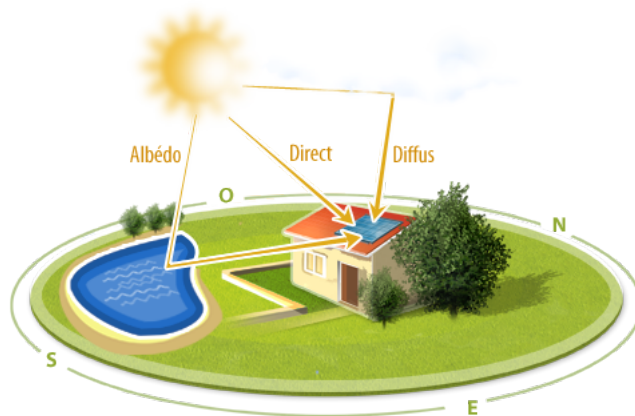


FIGURE 2.1 – Différentes formes de rayonnement

tante, en cas de ciel clair, l'énergie atteignant le sol est d'environ  $1000 \text{ W/m}^2$ . De fait, une étude des différents types de rayonnements est nécessaire, le rayonnement incident global est soit direct, la partie du rayonnement solaire qui n'est ni absorbée ni réfléchi par l'atmosphère, et correspond au flux que nous visons à calculer. Le rayonnement réfléchi est lié à la réflexion des rayonnements direct et diffus par le sol. Enfin, le rayonnement diffus représente le flux, en provenance du ciel, il est souvent évalué en considérant que ce flux est isotrope ; toutes les parties du ciel émettent le même rayonnement. Pour cet effet, seule l'inclinaison de la paroi pondère le flux diffus incident. Cette hypothèse d'isotropie du flux diffus est correcte pour un ciel couvert où le rayonnement diffus prendrait le pas sur le rayonnement direct. Elle l'est moins pour un ciel clair, où le flux diffus est nettement plus important dans la zone du ciel environnant le soleil. Le calcul du flux diffus peut être donc évalué. Les facettes absorbent un flux diffus incident paramétré uniquement par les conditions du ciel et des propriétés géométriques de la facette, de son orientation et de son inclinaison. "L'apport énergétique dû à l'ensoleillement est constitue une part très importante des sollicitations énergétiques du bâtiment. Cependant, l'ensoleillement d'un bâtiment peut être largement affecté par la présence d'autres bâtiments voisins qui jouent le rôle de masques. Quantifier l'ombrage dû à ces masques est une tâche qui n'est pas évidente.



## 2.3 Objectif et démarche

Notre objectif est la quantification des apports énergétiques dues au rayonnement direct en fonction de la position du soleil à différents moments de la journée. Comme nous l'avons déjà mentionné, ce calcul n'est pas évident surtout si les géométries des bâtiments sont complexes. Pour cela, nous n'allons considérer dans ce travail que des bâtiments qui ont des formes parallélépipédiques ; et donc toutes les parois que nous manipulons sont rectangulaires. Cette simplification n'est pas très éloignée de la réalité surtout pour des grands parcs de bâtiments. Nous allons étudier l'influence d'un bâtiment voisin sur l'énergétique du bâtiment étudié.

## 2.4 Calcul d'ombrages

Une méthode intuitive de calcul des ombres consiste à prendre le point de vue du soleil (situé à l'infini), et à observer la scène urbaine. Tout ce qui est vu correspond à des surfaces éclairées, le reste est à l'ombre. Il existe deux types d'ombres :

LES OMBRES PROPRES correspondent aux surfaces d'un objet qui ne voient pas la source lumineuse car leur orientation lui est opposée. Par exemple, un cube a toujours entre une et trois faces éclairées par une source ponctuelle, les autres sont dans leur ombre propre. Ces surfaces peuvent être repérées par simple comparaison de leur normale avec la direction des rayons lumineux.

LES OMBRES PORTÉES correspondent aux ombres générées par un objet sur d'autres surfaces. Un calcul est alors nécessaire afin de déterminer les frontières entre les surfaces éclairées et celles à l'ombre.

Dans les géométries urbaines que l'on considère, les surfaces sont nécessairement des polygones, qui vont générer des ombres polygonales. Un calcul de projections, puis d'intersections de polygones doit ainsi permettre de déterminer les surfaces à l'ombre et les surfaces au soleil. La procédure permettant d'effectuer le calcul des ombres est détaillée ci-dessous.

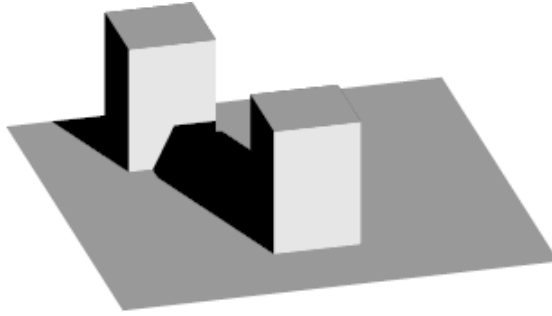


FIGURE 2.2 – Ombrage entre deux bâtiments

On souhaite calculer l'ombre d'une surface  $S_i$  sur une surface  $S_1$  incluse dans le plan  $P_1$ . Cette ombre, notée  $O(S_i \rightarrow S_1)$ , correspond à l'intersection de  $S_1$  et de l'ombre de  $S_i$  sur le plan  $P_1$  :

$$O(S_i \rightarrow S_1) = S_1 \cap O(S_i \rightarrow P_1)$$

Si l'intersection est nulle,  $S_i$  ne masque pas  $S_1$  pour cette position du soleil. L'ombre sur  $S_1$ , notée  $O(S_1)$  de l'ensemble des autres surfaces  $S_i$ ;  $i = 2..n$  est l'union des ombres sur  $S_1$  :

$$O(S_1) = \cup_{i=2}^n O(S_i \rightarrow S_1)$$

On déduit de cela la surface ensoleillée de  $S_1$ ,  $E(S_1)$  :

$$E(S_1) = S_1 - O(S_1) = S_1 - \cup_{i=1}^n O(S_i \rightarrow S_1)$$

L'ensemble de ces opérations se fait dans un repère en deux dimensions. Pour cela, les polygones projetés, ainsi que le polygone correspondant à la surface sur laquelle l'ombre est calculée, sont placés dans le plan  $xOy$ . Le temps de calcul étant directement lié au nombre de surfaces à projeter, deux accélérations sont considérées :

- Les géométries urbaines utilisées sont composées de volumes fermés. Il est dans ce cas possible de considérer que seules les surfaces ne faisant pas face au soleil (ou l'inverse) sont des masques potentiels.
- Les surfaces sont triées de manière à ne considérer que celles qui sont “devant” la surface sur laquelle l'ombre est calculée par rapport aux rayons du soleil.

Une fois établie la méthode de calcul des ombres pour une position du soleil, le calcul de l'énergie du rayonnement solaire sur les surfaces de la scène consiste à intégrer sur la période de temps d'intérêt le flux reçu multiplié par la surface éclairée de la paroi :

$$E_i = \int_{T_1}^{T_2} A_E \cdot I_{bn} \cdot \cos(\theta) \cdot dt$$

où  $A_E$  est l'aire éclairée de la surface  $i$  à l'instant  $t$ ,  $I_{bn}$  l'irradiance directe normale et  $\theta$  l'angle d'incidence des rayons solaires.

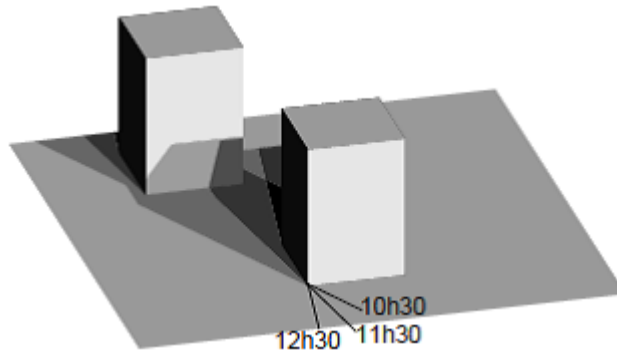


FIGURE 2.3 – Ombrage entre deux bâtiments à différents moments de la journée

## 2.5 Conception de l'algorithme de projection

On commence par la projection de la paroi masque sur le plan de la paroi étudiée, suivant la direction des rayons solaires  $u$ . Ceci est illustré sur la figure suivante.

Nous avons trouvé la formule donnant la projection  $\pi(P)$  d'un point  $P$  sur un plan de normale  $n$  d'équation :

$$ax + by + cz + d = 0$$

La formule de projection suivant la direction du soleil  $u$  est :

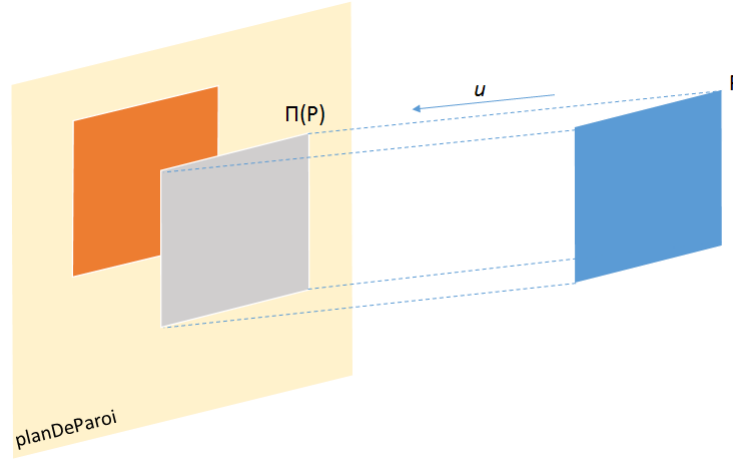


FIGURE 2.4 – Projection d’une paroi rectangulaire sur le plan de la paroi étudiée

$$\overrightarrow{O\pi(P)} = \overrightarrow{OP} - \frac{(\vec{n} \cdot \overrightarrow{OP})}{\vec{n} \cdot \vec{u}} \vec{u} - \frac{d}{\vec{n} \cdot \vec{u}} \vec{u}$$

En se basant sur cette formule, on réalise l’algorithme (par le langage Python) qui effectue la projection :

```
def projPointSurParoi (self,P,U):
    n=point(self.p2.y-self.pl.y,self.pl.x-self.p2.x,0)
    nScalU=n.x*U.x+n.y*U.y
    nScalOP=n.x*P.x+n.y*P.y
    d=(self.pl.x*self.p2.y-self.pl.y*self.p2.x)/(self.p2.x-self.pl.x)
    xPI=P.x-(nScalOP*U.x)/nScalU-(d*U.x)/nScalU
    yPI=P.y-(nScalOP*U.y)/nScalU-(d*U.y)/nScalU
    zPI=P.z-(nScalOP*U.z)/nScalU-(d*U.z)/nScalU
    PI=point(xPI,yPI,zPI)
    PI=self.p3Dvers2D(PI)
    return PI
```

FIGURE 2.5 – Fonction de projection d’un point sur une paroi

Après avoir effectué la projection en trois dimensions, nous allons nous rapporter au plan de la paroi étudiée pour effectuer l’intersection en deux dimensions, ceci va nous simplifier les calculs. Ce changement de dimension est effectué par la fonction **p3Dvers2D** (voir l’annexe). Puisque la paroi masque (verticale) est de forme rectangulaire et la paroi étudiée est verticale, alors la projection obtenue est un parallélogramme pour des parois verticales, vu le caractère parallèle des rayons lumineux.

## 2.6 Conception de l'algorithme d'intersection

Dans cette partie, on explicite la méthode d'intersection d'un rectangle avec un parallélogramme ; le rectangle représente la paroi étudiée du bâtiment central, le parallélogramme est la projection d'une paroi masque d'un bâtiment voisin. Une projection possible est montrée dans la figure ci-dessous.

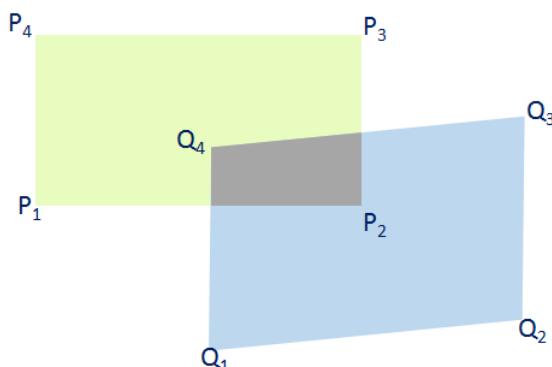


FIGURE 2.6 – Intersection d'un rectangle et d'un parallélogramme

Les conditions extérieures ; la position du soleil et des bâtiments imposent des conditions sur la position relative des deux quadrilatères, en l'occurrence,  $Q_1$  et  $Q_2$  sont au-dessous du sol : donc au-dessous de  $P_1$  et  $P_2$ . Cette remarque nous permettra de réduire le nombre de cas à analyser.

Pour ce faire, on considère que le plan est rapporté au repère d'origine  $P_1$  et d'axes de directions respectives  $(P_1P_2)$  et  $(P_1P_4)$ . Et on supposera en guise de simplification, que l'ordonnée de  $Q_3$  est supérieure à l'ordonnée  $Q_4$ , ce que l'on va justifier ci-dessous. La méthode que nous présentons dans ce mémoire consiste à construire de proche en proche la forme d'intersection (comme celle de la figure ci-dessus) en raisonnant sur l'abscisse de  $Q_3$  (identique à celle de  $Q_2$  car  $(Q_3Q_2)$  et  $(P_3P_2)$  sont parallèles). Ainsi, suivant que  $x_{Q_3} > x_{P_2}$  ou que  $y_{Q_3} < 0$ , les formes d'intersection sont soit un triangle, un trapèze, un pentagone ou l'ensemble vide (voir l'annexe ci-dessous).

Le premier cas est quand  $x_{Q_3} > x_{P_2}$  (on note désormais  $x_{P_2} = a$ ), ici, on a besoin de voir s'il y a une intersection entre le segment  $[Q_3Q_4]$  est la droite  $(P_3P_2)$ , puisque sinon (voir figure ci-dessous), le parallélogramme

se situe intégralement à droite du rectangle et il n'y a aucune intersection des deux figures.

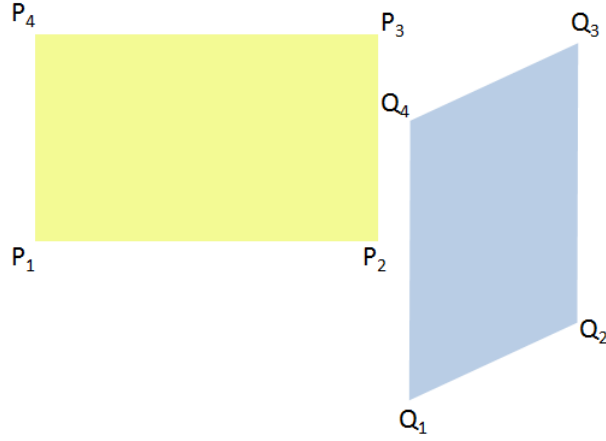


FIGURE 2.7 – Cas de non intersection

Dans le cas où l'intersection existe, nous avons intérêt à définir dans l'algorithme d'intersection quatre fonctions clé, qui à un segment du parallélogramme associe les coordonnées du point d'intersection avec chacun des côtés du rectangle  $P_1P_2P_3P_4$ , et deux variables booléennes, la première indique si ce point d'intersection appartient au segment du parallélogramme, et la deuxième si ce point appartient au côté du rectangle pris en compte par la fonction. Par exemple la fonction **interAvecDroiteVertP2**, incluse dans l'algorithme, donne pour le cas de la figure ci-dessus le triplet  $(I, 0, 1)$ , par contre, le cas de la figure ci-dessous donne  $(I_1, 1, 1)$ , l'idée est donc de définir  $I_1$  comme le premier point de la forme d'intersection, et pour définir le deuxième point on cherchera le résultat de **interAvecDroiteVertP1**, qui permet de définir le deuxième point de la forme d'intersection : le point  $I_2$ , en effet dès qu'il y a intersection entre les segments  $[Q_3Q_4]$  et  $[P_3P_2]$ , il n'y a aucune intersection entre  $[Q_3Q_4]$  et  $[P_3P_4]$ , ainsi la forme d'intersection  $I_1I_2P_1P_2$  est donnée ci-dessous :

On continue la distinction des cas en se basant sur les différents résultats des quatre fonctions clé, ce qui permet de construire toutes les formes d'intersection possibles (voir annexe), le cas où  $0 < x_{Q_3} < a$  est aussi fait dans l'annexe. Pour prendre en compte le cas où  $y_{Q_3} < y_{Q_4}$ , l'idée est de symétriser toutes les figures réalisées par rapport à l'axe vertical de symétrie du rectangle, en faisant bien évidemment attention à ce que l'ordre des points soit respecté. Cette démarche est explicitée vers la

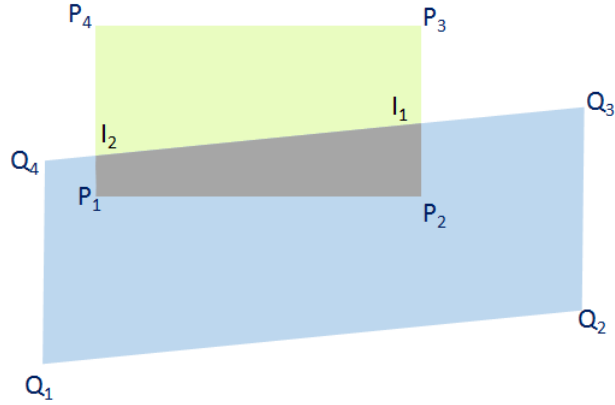


FIGURE 2.8 – Construction de la figure d'intersection

fin de l'algorithme, on utilise pour cet effet une fonction **symRapAxe**.

A ce stade, il reste le cas où  $y_{Q_3} = y_{Q_4}$ . Ce cas présente huit configurations, leur distinction est plus facile, et se base sur les valeurs de  $x_{Q_1}$  et  $y_{Q_3}$  (voir le code en annexe).

## Chapitre 3

# Modélisation du comportement thermique d'un parc de bâtiments : le modèle détaillé et la réduction de modèle

### 3.1 Introduction

Un parc de bâtiments peut être vu comme un ensemble de zones thermiques (de l'air à température homogène) échangeant de l'énergie à travers leur enveloppe (parois, vitrages, renouvellement d'air etc.) en fonction des conditions aux limites (Flux solaires, température extérieure, vent etc.). L'évaluation de ces échanges thermiques passent par la modélisation de la conduction dans les parois, la convection entre paroi, du rayonnement entre GLO entre paroi ou CLO en fonction de l'ensoleillement ou par ventilation. La conduction dans une paroi est traitée en 1D selon l'épaisseur de la paroi supposée plane et de largeur et longueur suffisamment grande devant l'épaisseur. La paroi est constituée de matériaux homogènes chacun discrétisé spatialement selon l'épaisseur de façon à respecter le pas de temps qui sera utilisé. Dans ce chapitre, on veut décrire l'évolution thermique d'un parc de bâtiments. On va expliquer la méthode pour faire un bilan énergétique d'un quartier et obtenir la variation température dans les zones intérieures des bâtiments. Pour réaliser le calcul du bilan énergétique numériquement, on va faire une discrétisation en appliquant la méthode des éléments finis. On appelle « couche élémentaire » l'élément unitaire d'un paroi résultant de cette discrétisation. Dans la réalité, un mur est souvent composé de plusieurs



couches de matériau homogène, et chaque couche de matériau homogène peut être considéré comme une série de plusieurs couches élémentaires de même matériau homogène. Ainsi, dans notre modèle, un mur est comme ce qui décrit dans la figure (A).

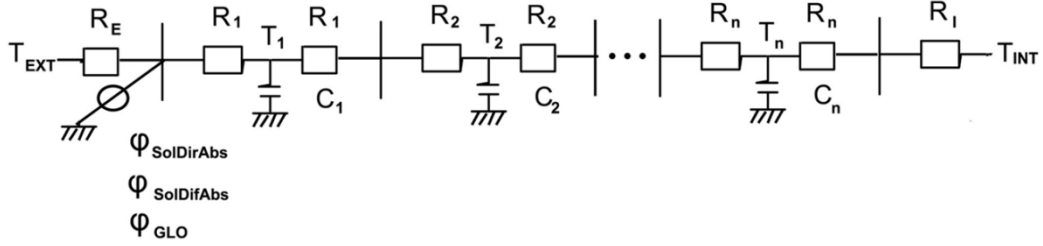


FIGURE 3.1 – Modèle de paroi

On prend les températures au milieu de chaque couche élémentaire et les températures dans chaque zone intérieure des bâtiments comme les variables du problème. En faisant le bilan énergétique de chaque zone, on obtiendra un système d'équations du parc de bâtiments. La solution de ce système d'équations nous donnera les températures dans chaque zone et les températures au milieu de chaque maille élémentaire. Mais comme il y pourrait avoir une dizaine ou centaine de murs dans un parc de bâtiments, ce système aurait une taille énorme, avec des milliers d'équations.

Certes, on peut résoudre un système d'équations comme ça. Mais le calcul va prendre beaucoup de temps. Du coup on veut faire une réduction du système d'équations en gardant une meilleure approximation et précision pour diminuer le temps de calcul. Pour cela, on va d'abord écrire la représentation matricielle du système, ensuite faire la réduction.

## 3.2 Le modèle détaillé

Dans cette partie, on va faire le bilan énergétique du système, et établir le système d'équations correspondant. On appelle ce système d'équations le modèle détaillé du parc de bâtiments.

### 3.2.1 présentation du cas traité

On va considérer un quartier comme un ensemble de bâtiments composés de parois planes enfermant des ambiances. Les caractéristiques phy-

siques des matériaux sont supposées constantes et homogènes dans chaque tranche de chaque paroi. L'ensemble d'espace sous la couverture d'un bâtiment sera considéré comme une zone thermique de même température.

La cellule est soumise à un ensemble de sollicitations au niveau des faces des parois (convection, rayonnement solaire direct, diffus, rayonnement infra-rouge), sur l'air et à l'intérieur des parois (absorption dans les vitrages, plancher chauffant).

Il y a trois modes de transmission de la chaleur : la convection, la conduction et le rayonnement. Le flux solaire absorbé par les bâtiments est considéré comme l'élément dominant des apports énergétiques du système. Le calcul du flux solaire absorbé est expliqué dans le chapitre précédent, on le prend comment une donnée pour la suite.

On distingue différents types de structures qui servent comme l'interface entre la zone intérieure d'un bâtiment et l'environnement extérieure : le mur, le vitrage, le pont thermique, etc. Chaque structure a un comportement énergétique différent. On va commencer par parler de modèle physique d'échange thermique dans ces structures et petit à petit de construire le modèle détaillé de l'ensemble du système.

### 3.2.2 l'approximation numérique d'une couche de matériau homogène

Considérons une couche de matériau homogène de conductivité thermique  $\lambda$ , d'épaisseur  $e$  et de surface  $1m$ . Soient  $T_{SE}$  la température de la surface extérieure et  $T_{SI}$  la température de la surface intérieure.

Comme le représente dans la figure(3.2), une couche élémentaire est caractérisée par sa demi-résistance thermique  $R$  et sa capacité thermique  $C$ . Dans la pratique, on connaît à priori les propriétés physiques du matériau : la densité  $\rho$ , la chaleur massique  $C_p$  et la conductivité  $\lambda$ . Et  $R$  et  $C$  peut être calculé comme :  $R = \frac{e}{2\lambda}$ ,  $C = \rho C_p e$

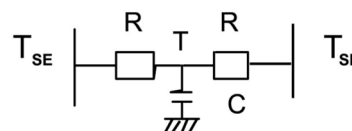


FIGURE 3.2 – Modèle d'une couche de matériau

Le comportement thermique de la couche est caractérisé par l'équation

de la chaleur :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q$$

Selon la définition de la dérivée, on a

$$\frac{\partial T(t, x)}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{T(t, x + \Delta x) - T(t, x)}{\Delta x}$$

Pour l'épaisseur  $e$  assez petite, on a

$$\frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \approx \frac{T(t, x + \Delta x) - T(t, x)}{\Delta x}$$

En l'appliquant à l'équation de la chaleur d'une couche de matériau homogène précédente, on en déduit que pour  $q = 0$  :

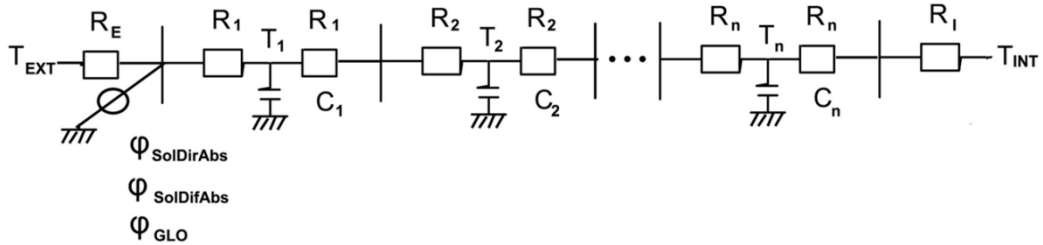
$$C\dot{T} = \frac{T_{SE} - T}{R} + \frac{T_{SI} - T}{R}$$

Donc, on a

$$\dot{T} = -\frac{2}{RC}T + \frac{1}{RC}T_{SE} + \frac{1}{RC}T_{SI}$$

### 3.2.3 Les équations pour un mur

Maintenant, revenons dans le cas d'un mur composé de plusieurs couches de matériau.



Il y a un flux solaire projette sur sa face extérieure et on en distingue le flux solaire diffus et flux solaire direct.

Dans le cas d'un mur opaque, ce flux incident va considéré comme totalement absorbé par le mur ; dans le cas d'un vitrage, celui-ci absorbe

une partie du flux solaire tandis qu'il en transmet une partie à l'intérieur de la zone thermique. Ce flux transmis est supposé complètement absorbé par le plancher.

1. cas du mur composite opaque

le flux absorbé :  $\varphi_{abs} = \alpha \varphi_{incident}$

où  $\alpha$  est le coefficient d'absorption

Soient  $T_{ext}$  la température extérieure et  $T_{int}$  la température intérieure. Et maintenant on considère en plus la convection et le rayonnement, on obtient ainsi un système d'équation différentielle :

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{T_2 - T_1}{C_1(R_1 + R_2)} + \frac{T_{EXT} - T_1}{C_1(R_E + R_1)} + \frac{R_E(\varphi_{SolDirAbs} + \varphi_{SolDifAbs} + \varphi_{GLO})}{C_1(R_E + R_1)}$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{T_{i-1} - T_i}{C_i(R_{i-1} + R_i)} + \frac{T_{i+1} - T_i}{C_i(R_{i+1} + R_i)} , \quad i = 2, \dots, n-1$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{T_{n-1} - T_n}{C_n(R_{n-1} + R_n)} + \frac{T_{INT} - T_n}{C_n(R_n + R_I)}$$

En écrivant sous la forme matricielle, on a :

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{n-1} \\ T_n \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} \\ 0 & \dots & 0 & a_n & b_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{n-1} \\ T_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} * & * & * & * & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & * & * \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{SolDirAbs} \\ \varphi_{SolDifAbs} \\ \varphi_{GLO} \\ T_{EXT} \\ T_{INT} \end{pmatrix}$$

où  $a_i = \frac{1}{C_i(R_{i-1} + R_i)}$ ,  $b_i = -\frac{1}{C_i(R_{i-1} + R_i)} - \frac{1}{C_i(R_{i+1} + R_i)}$ ,  $c_i = \frac{1}{C_i(R_{i+1} + R_i)}$  et pour de la matrice B : nombre de lignes doit être égal à n.

Notons  $\dot{T} = AT + BU$

Et on appelle  $T$  : le vecteur d'état du système;  $U$  : le vecteur des sollicitations extérieurs;  $A$  : la matrice d'état. On voit que la matrice d'état  $A$  est une matrice tridiagonale.

2. cas du vitrage

Au vitrage(voir la figure 3.3), il y a le phénomène de réflexion, absorption et réfraction de la lumière. Une part du flux solaire incident arrive sur le vitrage va être réfléchié par le verre, une part va être absorbée par le vitrage et d'autre va être réfractée et transmis. La partie transmise va finalement être absorbée par le plancher à l'intérieur du bâtiment à côté du vitrage. Ici, seulement les parties absorbée et transmise font partie d'énergie entrant dans le système.

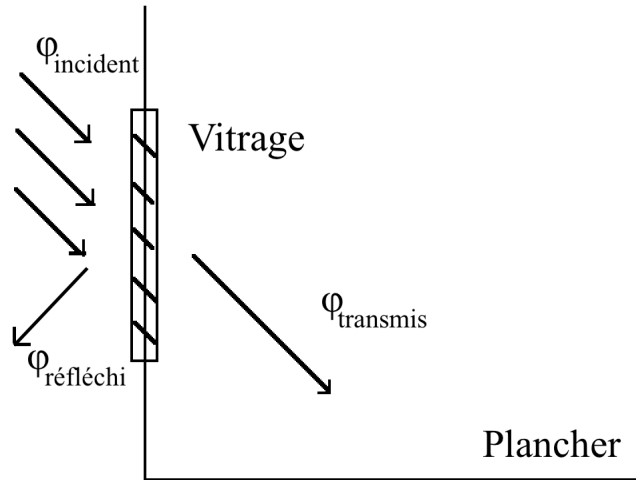


FIGURE 3.3 – Modèle du vitrage

Dans la suite, on va détailler le calcul pour ces deux parties. Le flux solaire incident est retiré des fichiers météologies et considéré comme donnée.

1) le flux absorbé par le vitrage :

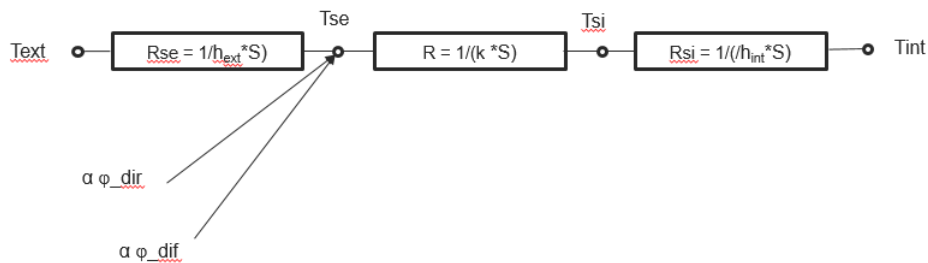


FIGURE 3.4 – Modèle thermique du vitrage

Où  $T_{ext}$  et  $T_{int}$

Donc, on a :

$$\phi_{absorbe} = \frac{R_{se}(\alpha\phi_{dir} + \alpha\phi_{dif})S + T_{ext} - T_{int}}{R_{se} + R + R_{si}}$$

2) le flux transmis :

$$\phi_{transmis} = (\tau_{dir}\phi_{dir} + \tau_{dif}\phi_{dif})S$$

Les transmittivités sont calculées en fonction de la transmittivité du vitrage en rayonnement visible direct sous incidence nulle : [2] [1]

$$\tau_{Direct,0}$$

(a) Pour le rayonnement visible diffus :

$$\tau_{diffus} = 0,9\tau_{Direct,0}$$

(b) Pour le rayonnement visible direct :

Si  $\cos(i) > 0,8$  :

Sinon :  $\tau_{Dir} = 2,5\tau_{Dir,0}\cos(i)(10,625\cos(i))$

Où  $\cos(i)$  = est le produit scalaire du vecteur normale à la paroi et du vecteur solaire.

### 3.2.4 Le système d'équations pour plusieurs zones

Maintenant, considérons deux chambres séparées par un mur. Les espaces intérieurs des deux chambres sont appelés Z1 et Z2. Les murs sont numérotés de 1 à 7 comme dans la figure (3.5).

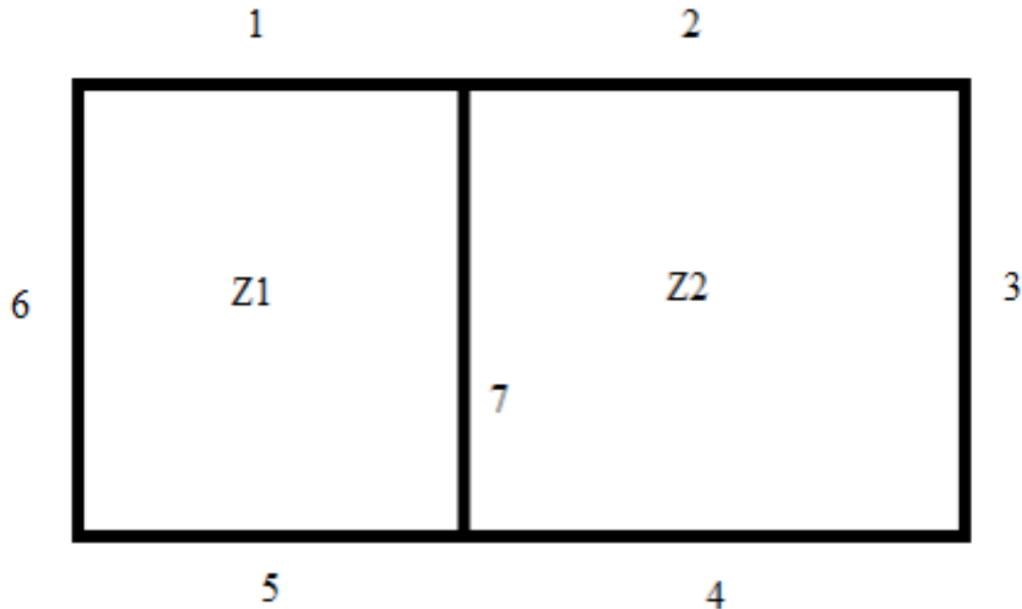


FIGURE 3.5 – Exemple d'un bâtiment

Alors le comportement énergétique de Z1 satisfait :

$$\rho C_p V \frac{\partial T_{int1}}{\partial t} = \sum \frac{T_{SIi} - T_{int1}}{R_i}$$

avec  $i = 1, 5, 6, 7$ ;  $T_{int}$  la température intérieure du Z1

De même, pour Z2, on a :

$$\rho C_p V \frac{\partial T_{int2}}{\partial t} = \sum \frac{T_{SIi} - T_{int2}}{R_i}$$

Soient  $n_i$  le nombre de couches pour chaque mur,  $T_{ij}$  la température au milieu de couche  $j$  pour le mur  $i$ ,  $1 \leq i \leq 7$ ,  $1 \leq j \leq n_i$

Le vecteur d'état du système est :

$$T^T = ( T_{int1}, T_{int2}, T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1n_1}, \dots, T_{71}, T_{72}, \dots, T_{7n_7} )$$

En appliquant le modèle d'une paroi à chaque mur, on obtient la matrice d'état qui est de la forme : (Ici on prend  $n_1 = 5$ ,  $n_2 = 4$ ,  $n_3 = 3$ ,  $n_4 = 3$ ,  $n_5 = 4$ ,  $n_6 = 4$ ,  $n_7 = 4$ )

Où les \* signifient les termes non nul dans la matrice.

D'un point de vu de la théorie de graphe, la numérotation de noeuds capacitifs peut être fait comme dans la figure 3.7. Les sommets représentent des zones thermiques ou des noeuds capacitifs. Les arcs entre les noeuds indiquent existence d'échange de flux thermique.

On peut écrire la matrice d'adjacence (voir la figure 3.8) du système pour révéler les liens entre les sommets d'une façon plus claire :

Si  $i \neq j$  :  $A[i, j] = 1$  (si  $i$  et  $j$  sont liés) ou 0 (sinon)

Si  $i = j$  :  $A[i, j] =$  nombre de arcs qui sont liés à ce sommet

Dès que l'on obtient les matrices  $A$  et  $B$ , on peut les modifier facilement par ajouter ou supprimer des sommets ou des arcs.

### 3.3 La réduction de modèle

Le problème de réduction consiste à rechercher, par une procédure d'approximation, un autre modèle linéaire de dimension  $n$  très inférieure

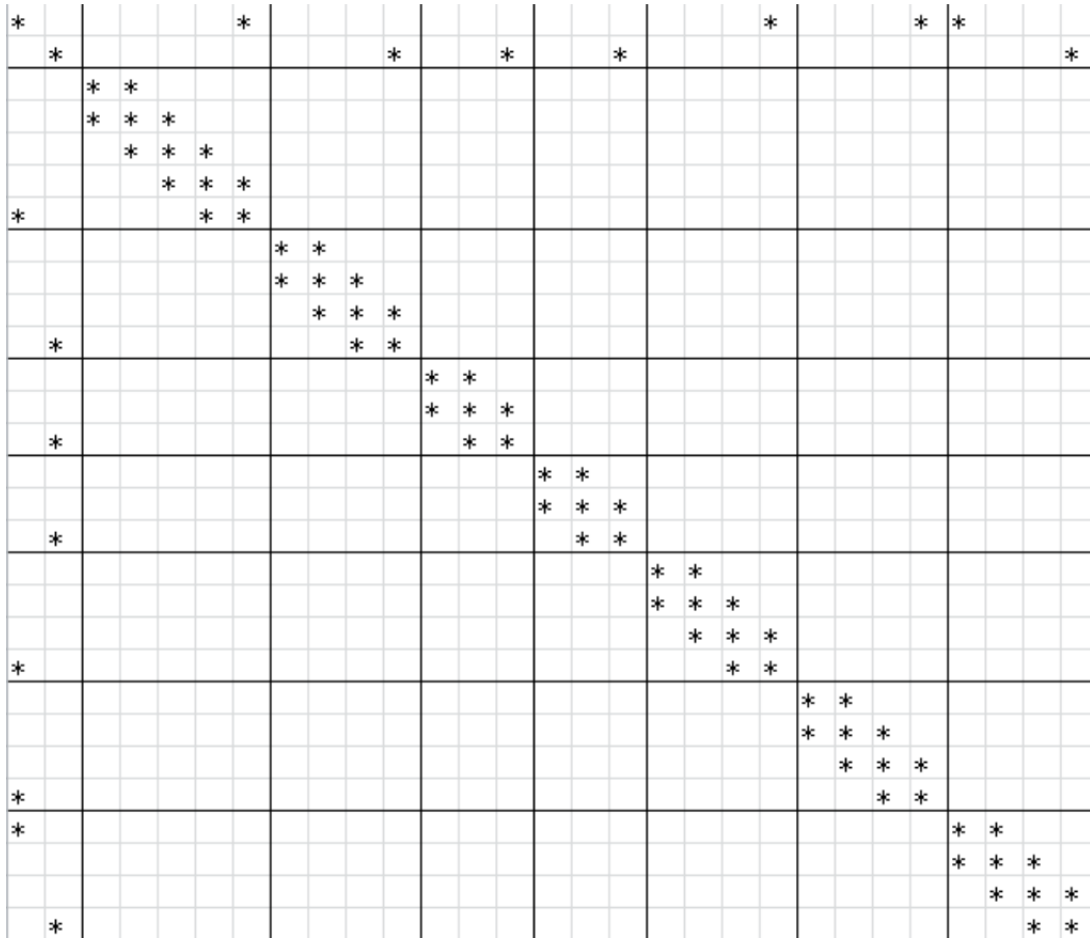


FIGURE 3.6 – La forme de matrice d'état

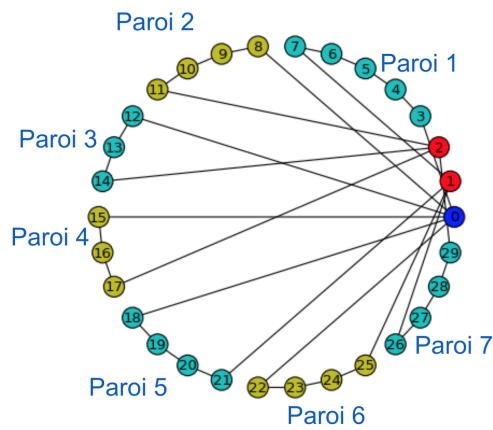


FIGURE 3.7 – Représentation graphique d'insertion des noeuds de parois

à  $N$ , qui simule correctement l'évolution thermique du système. L'objectif est de transformer un modèle dynamique de « grande taille » en un





FIGURE 3.8 – Matrice d'adjacence

système dynamique de taille réduite en fin d'améliorer des performances de calculs. Il en existe plusieurs méthodes. On va faire une brève présentation de quelques-unes et détailler la méthode de Moore qui est une méthode de réduction par troncature dans la base équilibrée.

### 3.3.1 panorama des méthodes de réduction

Ici, on présente brièvement quelques méthodes directes de réduction de modèle à partir d'une représentation de connaissance interne.

#### 1. par troncature

Généralement, on va d'abord exprimer le système dans une certaine base pour concentrer les termes non nuls dans la matrice d'état sur sa diagonale en faisant un changement de base, ensuite on va tronquer le système en gardant les états qui représentent des facteurs les plus dominants. On n'a pas de connaissance a priori de la précision, mais ce type de calcul est très efficace en temps de calcul. Il y a typiquement deux types de base qu'on utilise pour la troncature, la base modale et la base équilibrée. On va détailler plus tard la méthode de troncature en utilisant la base équilibrée.

#### 2. Par minimisation/optimisation

Si on veut contrôler la précision du système réduit, on peut appliquer la méthode par minimisation. Mais l'inconvénient est qu'il est

très lourd en calcul. A partir du modèle détaillé et du modèle réduit, on cherche à minimiser le critère et développer l'algorithme de minimisation. Par exemple, il y a la méthode de Glover qui utilise la norme de Hankel.

### 3. Méthode mixte

Comme la méthode de Marshall qui utilise la base modale pour la troncature, la méthode de Michailenco commence par une transition dans la base modale. C'est une troncature dans la base modale selon un critère énergétique. Après troncature, l'erreur de la réduction est minimisée, (c'est pourquoi elle est une méthode mixte) Une sélection des modes pour minimiser l'erreur de sortie au sens de L2 est faite.[5]

## 3.3.2 la méthode de Moore

La méthode de Moore consiste dans un premier temps à passer de la base thermique à la base équilibrée qui est construite à partir des notions de commandabilité et d'observabilité, employées en automatique. Ensuite, la troncature est faite par conserver seulement les composantes d'état du système les plus dominants, au sens de la commandabilité et de l'observabilité.[3]

### 1. passage en base équilibrée

On prend le système de modèle détaillé que l'on a obtenu précédemment comme notre système de départ. Il est exprimé sur la base thermique.

Le système initial (dimension N) :

$$\begin{aligned}\dot{T} &= AT + BU \\ Y &= JT + G_0U\end{aligned}$$

Les composantes d'états commandables et observables sont définies par leurs matrices de commandabilité  $W_c$  et d'observabilité  $W_o$ , obtenues par une résolution de type Lyapunov :

$$\begin{aligned}AW_c + W_cA^T &= -BB^T \\ A^TW_o + W_oA &= -J^TJ\end{aligned}$$

La base équilibrée est construite de manière à ce que les matrices de commandabilité  $W_{ce}$  et d'observabilité  $W_{oe}$  soient identiques et égales à une matrice diagonale  $\Sigma$ . Où  $W_{ce}$  et  $W_{oe}$  sont les matrices de commandabilité et d'observabilité exprimées sur la base équilibrée.

$$W_{ce} = W_{oe} = \Sigma$$

Avec  $W_{ce} = P^{-1}W_cP^T$ ,  $W_{oe} = P^TW_oP$

La matrice  $\Sigma$  contient sur sa diagonale les valeurs singulières de Hankel du modèle. La matrice de passage  $P$  de la base thermique vers la base équilibrée permet d'obtenir ces valeurs singulières. Et  $P$  est obtenu par la diagonalisation du produit  $W_cW_o$ .

## 2. troncature dans la base équilibrée

Il y a deux façons de tronquer le système.

La troncature classique consiste à conserver des  $n$  états les plus commandables et observables. Ils correspondent aux valeurs singulières les plus grandes[4].

Décomposition par blocs (dans la base équilibrée) :

$$\begin{pmatrix} \dot{T}_d \\ \dot{T}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{dd} & A_{df} \\ A_{fd} & A_{ff} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_d \\ T_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_d \\ B_f \end{pmatrix} U$$

$$Y = \begin{pmatrix} J_d & J_f \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_d \\ T_f \end{pmatrix} + G_o \times U$$

On garde seulement les états les plus dominants au sens de la commandabilité et de l'observabilité. Ils sont indicés  $d$ .

L'autre façon de troncature consiste à assurer le régime statique en faisant la correction :

$$\begin{cases} T_1 = (A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})T_1 + (B_1 - A_{12}A_{22}^{-1}B_2)U \\ Y = (J_1 - J_2A_{22}^{-1}A_{21})T_1 + (G_o - J_2A_{22}^{-1}B_2)U \end{cases}$$

# Chapitre 4

## Étude du projet sur Modelica

### 4.1 Description théorique du modèle thermique des bâtiments sur Modelica

Notre objectif principal est de pouvoir modéliser et simuler un parc de bâtiments réel. Pour ce faire, nous utilisons OpenModelica : c'est un langage de modélisation orienté objet, qui nous permet de modéliser pratiquement les différentes étapes intermédiaires avant d'arriver à notre objectif final.

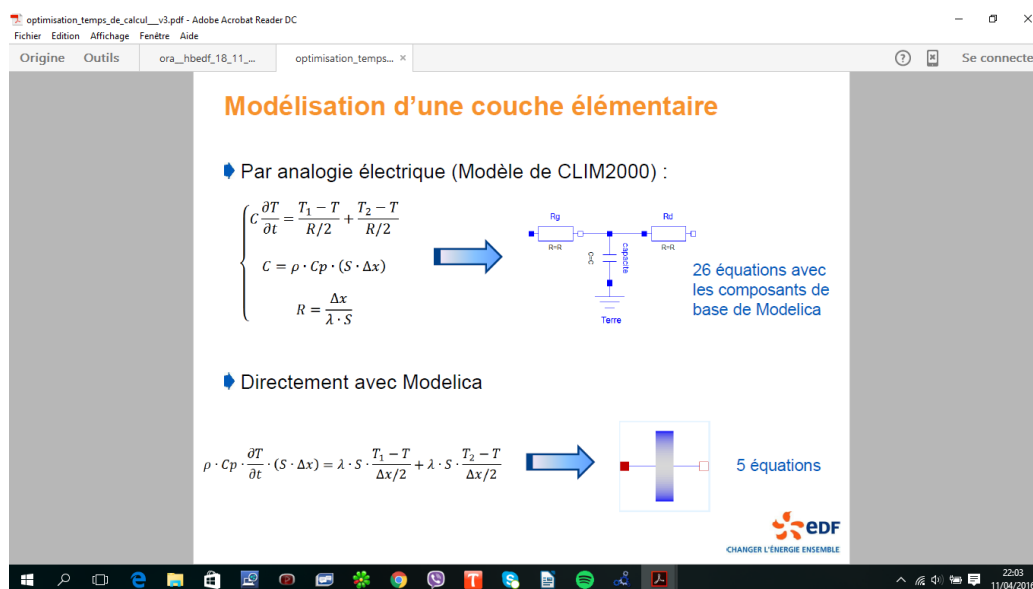


FIGURE 4.1 – Modélisation d'une couche élémentaire

La figure (4.2) résume en gros l'objectif du travail fait à l'aide de Modelica. Connaissant les équations régissant le système d'une couche élémentaire avec son modèle électrique, nous passons à Modelica qui s'occupe de

tous les calculs et simplifications et de résoudre ce problème en seulement 5 équations.

Les modèles sur lesquels nous avons travaillé tout au long de l'année concernent, suivant l'ordre chronologique, d'abord la modélisation d'une couche et donc d'une paroi. La modélisation d'une paroi repose sur la discrétisation de celle-ci en plusieurs couches simples et chaque couche est caractérisée par un pas :

$$\Delta x = \lambda \times R \times S$$

En regroupant les couches élémentaires d'un même matériau homogène on parvient ainsi à constituer une paroi complète d'un bâtiment comme le montre la figure ci-contre .

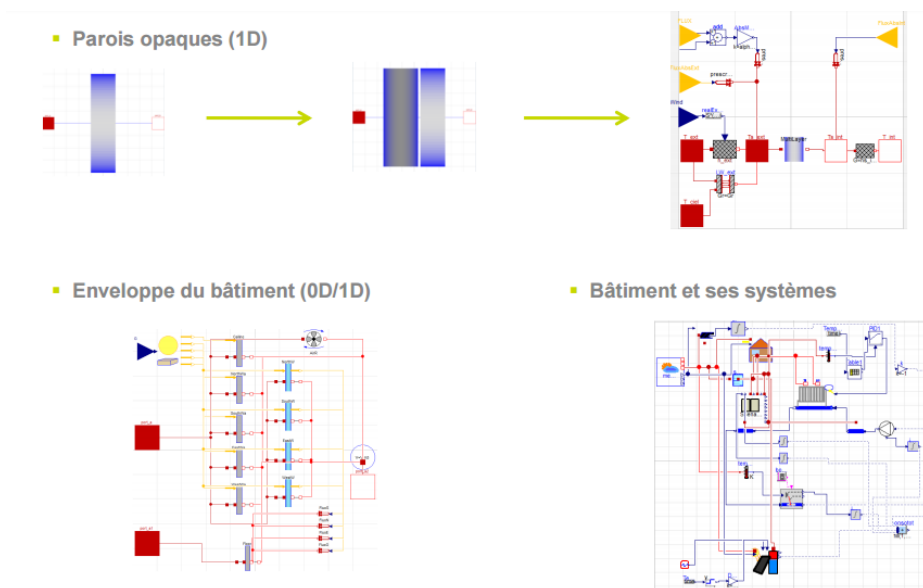


FIGURE 4.2 – Modélisation d'une couche élémentaire

Cette figure montre l'acheminement des étapes de notre travail grâce à BuildSysPro, nous entamons par la modélisation d'une simple couche, puis une paroi qui n'est qu'une suite de couches, nous modélisons ensuite un bâtiment, que l'on a fait évoluer avec les systèmes de vitrage. Et donc cela nous conduit à modéliser un parc de bâtiment, nous avons modélisé plus exactement un exemple d'un parc à deux bâtiments ( 4 et 7 ) avec les échanges de convection comme transferts thermiques. La puissance totale qu'il faut pour atteindre la température consigne à l'intérieur d'un bâtiment est donnée par :



ci-dessus :

e-Le rayonnement solaire qui atteint une surface vitrée est réfléchi, transmis et absorbé dans des proportions variables suivant la nature du vitrage. On peut chercher à privilégier une seule de ces trois qualités (c'est le cas des immeubles de bureau qui cherchent à réduire la transmission lumineuse), mais suivant le cas on peut également garder une certaine harmonie dans ces trois facteurs. C'est la proportion du flux énergétique que le vitrage laisse passer, qui s'exprime en pourcentage du rayonnement reçu, que l'on appelle facteur solaire  $g$ . Il représente la somme du rayonnement transmis et celle du rayonnement absorbé puis retransmis vers l'intérieur par le vitrage. Le coefficient de transparence, c'est le pourcentage de lumière solaire transmise. Elle ne mesure pas l'énergie transmise (sous forme calorifique) mais uniquement le pourcentage de la lumière transmise. Le coefficient de transfert thermique se mesure en watt par mètre carré-kelvin et correspond à la capacité d'un vitrage à stopper les déperditions de chaleur, appelées aussi déperditions thermiques. Le coefficient de déperdition thermique peut être amélioré par l'emploi de solutions suivantes : ajout d'une deuxième ou troisième vitre : le double ou triple vitrage ; remplacement de l'air contenu entre les deux vitres par un gaz rare plus lourd que lui de type argon ou krypton.

La figure ci-dessus donne un schéma regroupant les étapes expliquant le fonctionnement d'un vitrage :

La figure suivante montre la modélisation du vitrage sur Modelica grâce à la librairie BuildSysPro, qui regroupe donc toutes les fonctionnalités liées au vitrage.

Nous avons ensuite pensé à intégrer le plancher dans notre étude, il est déjà donné en modélisation sur Open Modelica sur la librairie BuildSysPro. Nous avons donc essayé de comprendre la modélisation faite avec les hypothèses et équations correspondantes. L'explication est donnée juste après la figure ci-dessus qui montre le plancher modélisé sur Modelica.

Ce modèle d'une dalle de plancher sur sol, le sol étant modélisé comme purement conducteur, considère les flux solaires transmis par les fenêtres. C'est ce modèle de Plancher intérieur avec une condition aux limites de la température inférieure (température du sol). La modélisation ne considère

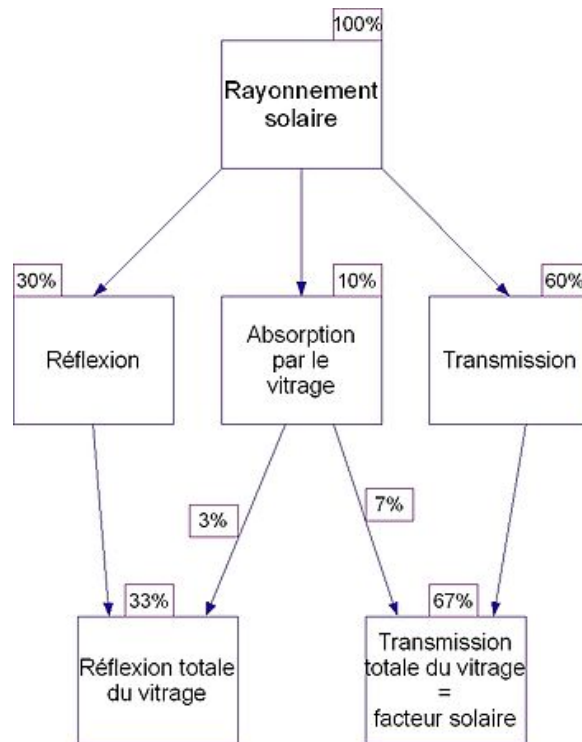


FIGURE 4.4 – Modélisation sur buildSysPro d'un vitrage

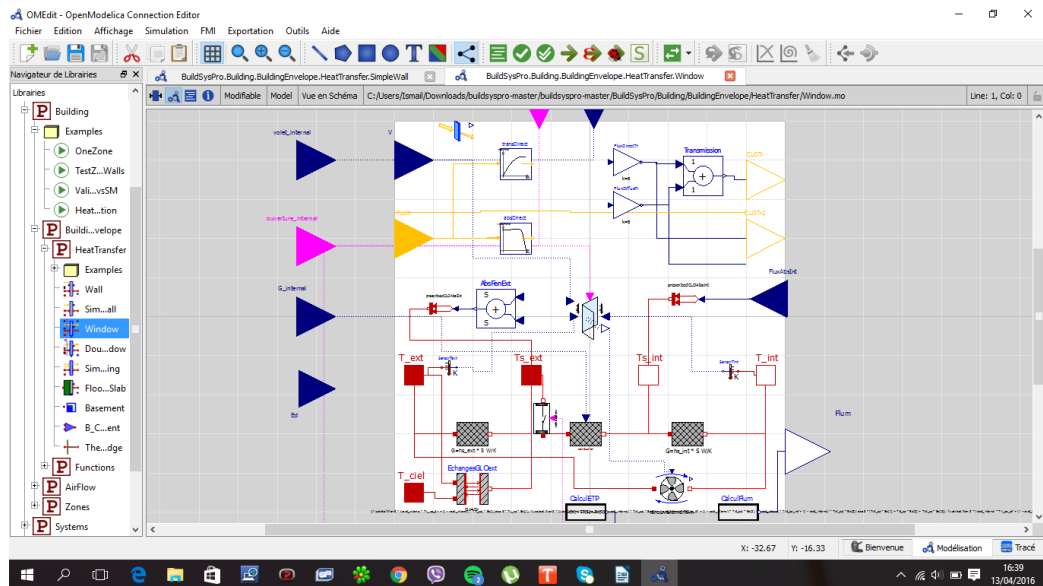


FIGURE 4.5 – Modélisation d'un plancher sur BuildSysPro

que la conduction 1D dans le plancher et le sol. Sur la face supérieure, les échanges de convection et de longues longueurs d'onde sont modélisés par une surface globale coefficient d'échange  $h_s$ . Le paramètre optionnel RadInterne permet de prendre en compte les flux de courtes longueurs



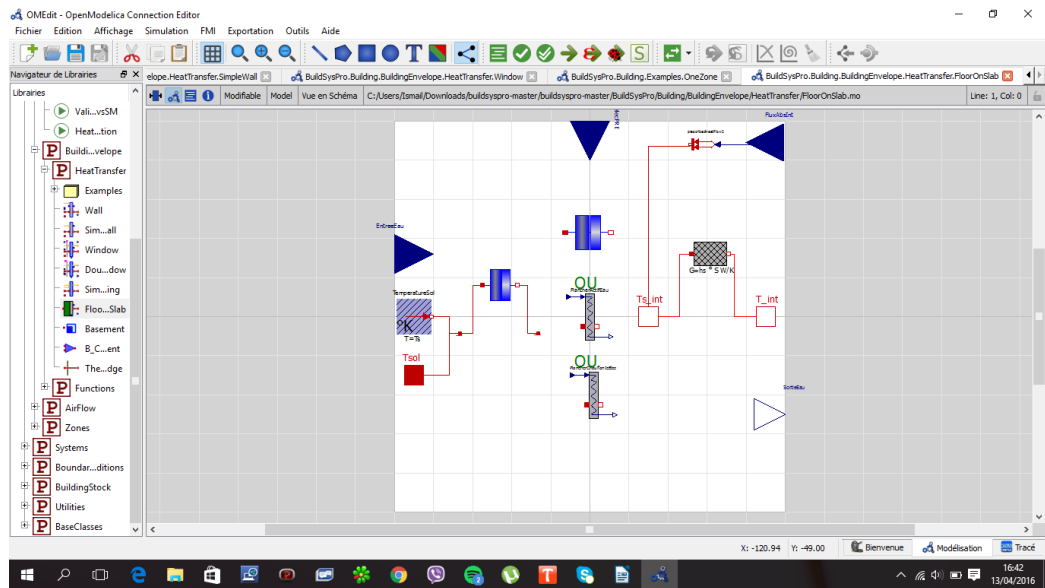
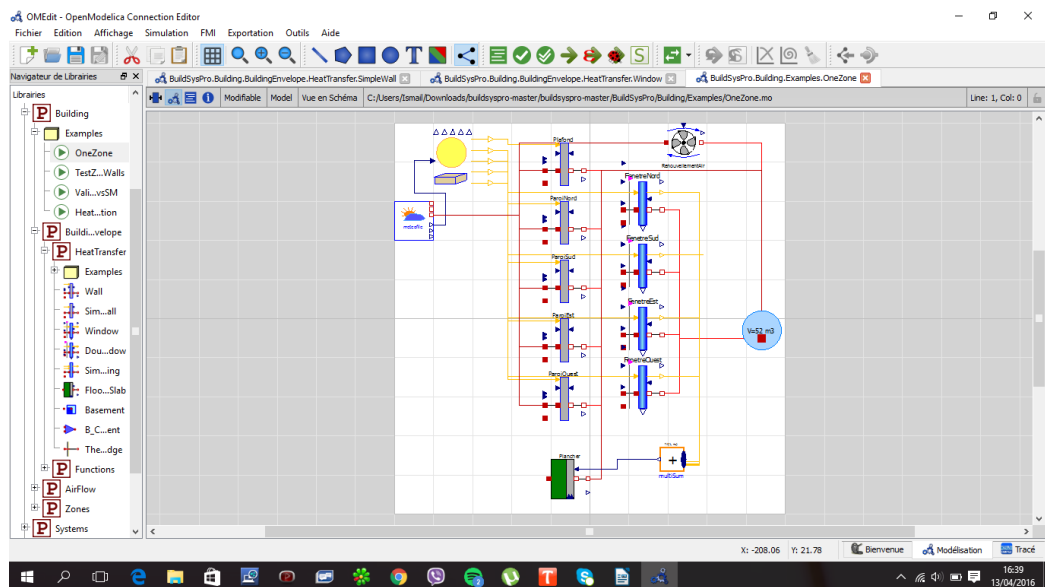


FIGURE 4.6 – Modélisation d'un bâtiment sur

d'onde. Le paramètre `SurEquiValentTerre` permet de prendre en compte une couche de terre dont l'épaisseur, la maille et le type (argile / limon ou sable / gravier) sont définis dans le paramètres de sol section. Dans le cas où ce paramètre est `False` la matière constitutive du sol doit être considéré dans le `CaracParoi` paramètre. Ensuite, la modélisation d'un bâtiment est donné par la figure suivante, en utilisant tout le vitrage pour chaque paroi ainsi que le plancher dans l'étude des transferts thermiques.



Nous avons enrichi notre étude avec le passage à un bâtiment qui est

modélisé par un cube constitué des 4 parois et éventuellement du toit et du plancher. d'une paroi sur le langage OpenModelica nous permet d'étudier plusieurs aspects différents. La simulation sur OpenModelica nous a permis d'analyser la variation de la température entrante et sortante ainsi que la convergence de la température intérieure de la couche à la température finale consigne. On est donc passé à l'étape suivante consistant à étudier une paroi qui n'est rien d'autre qu'une suite de couches, Par la modélisation d'une paroi avec une condition au limite de température fixe, on a donc remarqué la façon dont lesquelles les températures convergent vers la température consigne et la variation de la température et des énergies induites. Concernant l'étude d'un bâtiment simple, nous avons simulé le système avec les différents facteurs d'entrée ( flux solaire, température, flux.. ) et intégré les systèmes de ventilation et d'autres systèmes pour une étude plus complète. Cela sera développé dans la prochaine section.

## 4.2 Modélisation d'un bâtiment isolé dans son environnement

Le but de cette partie est d'esquisser les étapes de la modélisation d'un bâtiment asservie par une température consigne et qui voit des conditions aux limites de température et de flux solaire que l'on a obtenu grâce au fichier météo qui regroupe toutes les données de flux/température .  
Modèle monocouche :

Le premier modèle que représente la figure ci-dessous , regroupe une couche de béton qui voit une température extérieure qui correspond à la première entrée ( flèches bleues à droite cf . Figure 4.7 ) et une masse d'air qui représente notre milieu , et une seconde entrée qui représente notre température consigne  $T_c$  en sortie on recueille la température intérieure du sac d'air et l'énergie consommée pour atteindre notre température  $T_c$  .

La figure 4.8 prend en compte une température extérieure  $T_{ext}$  qui oscille autour de 273 ,15 K avec une amplitude de 5 K avec une période du quart de la journée et une température consigne  $T_c = 273 ,15$  K comme le montre la figure 4.8

Les simulations de ce modèle simple nous donnent en sortie une température intérieure comme le montre la figure 4.9 où la température atteint

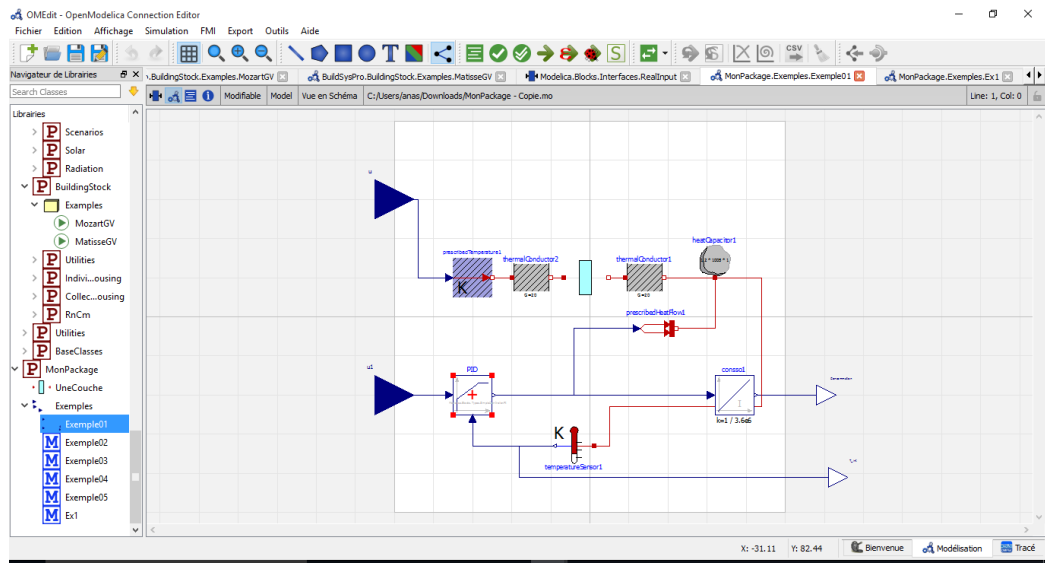


FIGURE 4.7 – Modèle d'une monocouche

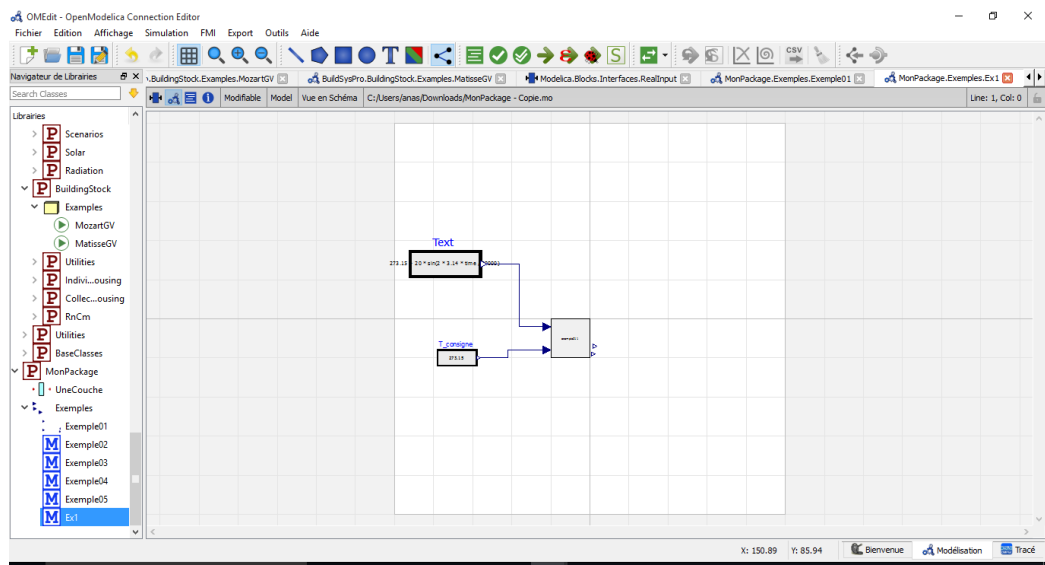


FIGURE 4.8 – Modèle d'une monocouche avec les entrées

sont régime stationnaire au bout d'une demi-journée puis la température commence à osciller sous forme de bosses autour de la valeur de  $T_c$  avec une amplitude  $5K$  comme attendu à cause des conditions aux limites , l'énergie quant à elle augmente en marche d'escalier comme le montre la figure 4.10 , c'est en effet un résultat attendu à cause du fait qu'une fois la masse d'air atteint la température  $T_c$  le système arrête de pomper de l'énergie et sachant que la température extérieure oscille autour de la température  $T_c$  cela oblige le système à fournir de l'énergie pour com-

penser les pertes énergétiques avec l'extérieur au bout de chaque quart de période cf figure 4.10 .

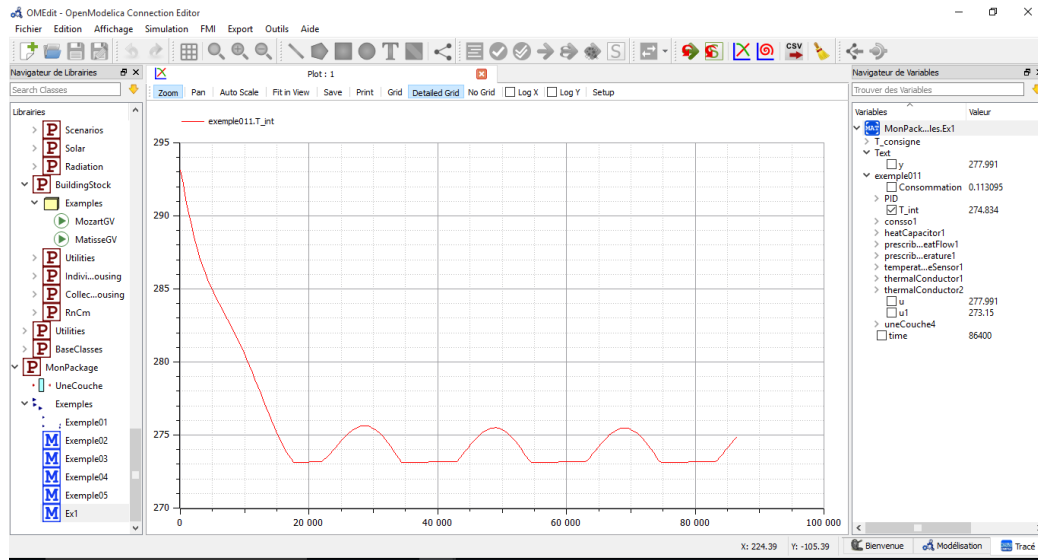


FIGURE 4.9 – Température interne de la zone d'air

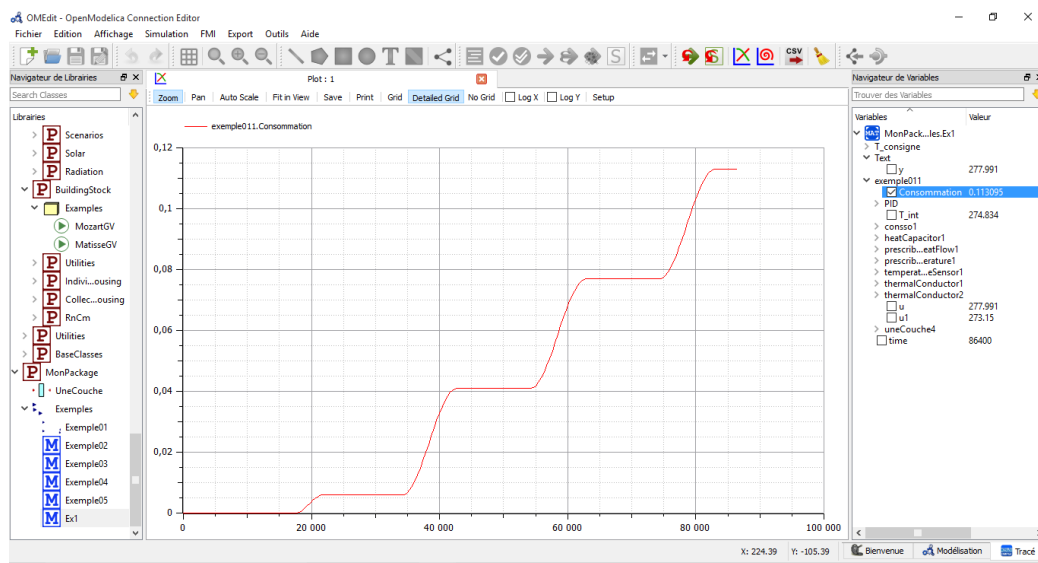


FIGURE 4.10 – Energie consommée

Modèle mono-zone :

Notre deuxième modèle un peu plus complexe que ce premier modèle représente une mono-zone c'est-à-dire modélise un bâtiment composé de quatre murs et d'un plafond et d'un plancher en plus des vitrages sur chaque mur comme le montre notre modèle asservi cf . Figure 4.11 , dans

ce modèle on a pris comme conditions aux limites des données météo qui proviennent d'un fichier texte qui contient toutes les données relatives au flux solaire sur chaque paroi et les températures extérieures. De plus on a fait l'hypothèse que le flux incident sur le vitrage à une partie qui va être transmis et on considère que seule le plancher va absorber toute la partie transmise et qui va être redistribué sur les quatre murs par effet de bord avec le plancher . Le modèle que représente la figure 1 comporte une entrée qui représente la température consigne comme pour le modèle précédent , on a ajouté en plus un port thermique qui va nous servir plus tard lorsqu'on va traiter le coulage convectif entre plusieurs bâtiments on a pris en compte aussi l'effet de renouvellement de l'air à l'intérieur de notre masse d'air en introduisant une ventilation dans notre modèle . La

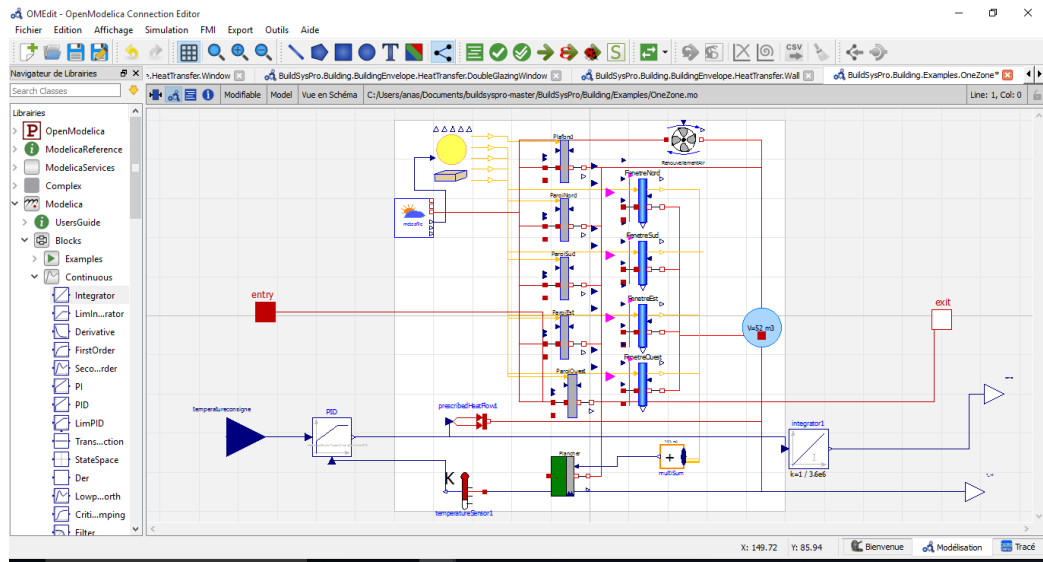


FIGURE 4.11 – Mdèle monozone

simulation de cette mono-zone pour une température consigne de 300K donne pour la température intérieure cf . Figure 4.12 où notre température augmente de la valeur  $T_0 = 293K$  pour atteindre comme attendu la valeur de la température  $T_c = 300K$  avec un régime transitoire qui atteint le régime permanent au bout de quelques heures de plus on remarque que notre température en régime transitoire est perturbée comme on peut le voir sur la figure ci-dessous ceci peut être dû à la présence de l'effet de renouvellement d'air ainsi que les conditions aux limites qui peuvent jouer un rôle important pour l'allure de la solution en température de notre modèle . Quant à l'énergie consommée par le système on remarque

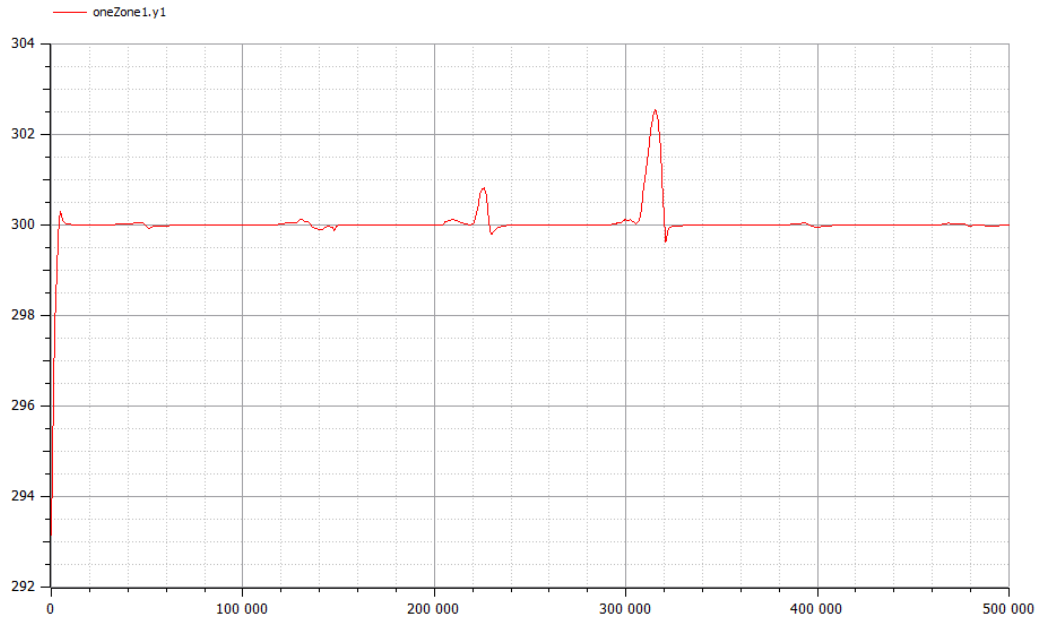


FIGURE 4.12 – Température de la zone d'air

une augmentation de l'énergie consommée par le système au départ afin d'atteindre la température consigne, le renouvellement d'air par ventilation aura pour effet des pertes énergétiques dans le système c'est-à-dire une énergie qui décroît comme on peut le voir sur la figure 4.13 et qui doit à un certain moment être compensée par une énergie qui devra être pompée au système qui se traduit par une ré-augmentation de l'énergie consommée par le système afin d'atteindre à nouveau le  $T_c$ . on pourra remarquer qu'au bout d'un temps long le système asservi est fortement instable cf . Figure 4.14 ce qui est probablement dû au fait qu'on n'a pas pris en compte l'énergie consommée par la pompe du ventilateur qui introduit un travail additionnel à la masse d'air qui conduit à cette forte fluctuation de la température du système et qui conduira à une décroissance de l'énergie du système qui sera restituée à l'extérieur , du coup au bout d'un temps long le système ne va plus pomper de l'énergie mais ne va faire que la restituer à l'extérieur .

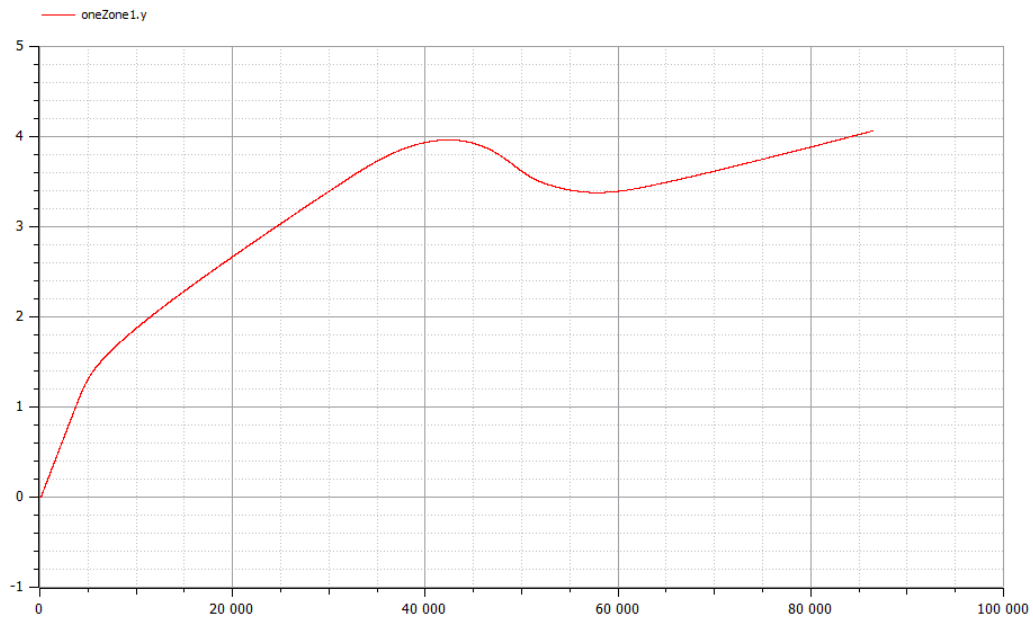


FIGURE 4.13 – Energie consommée par la zone d'air

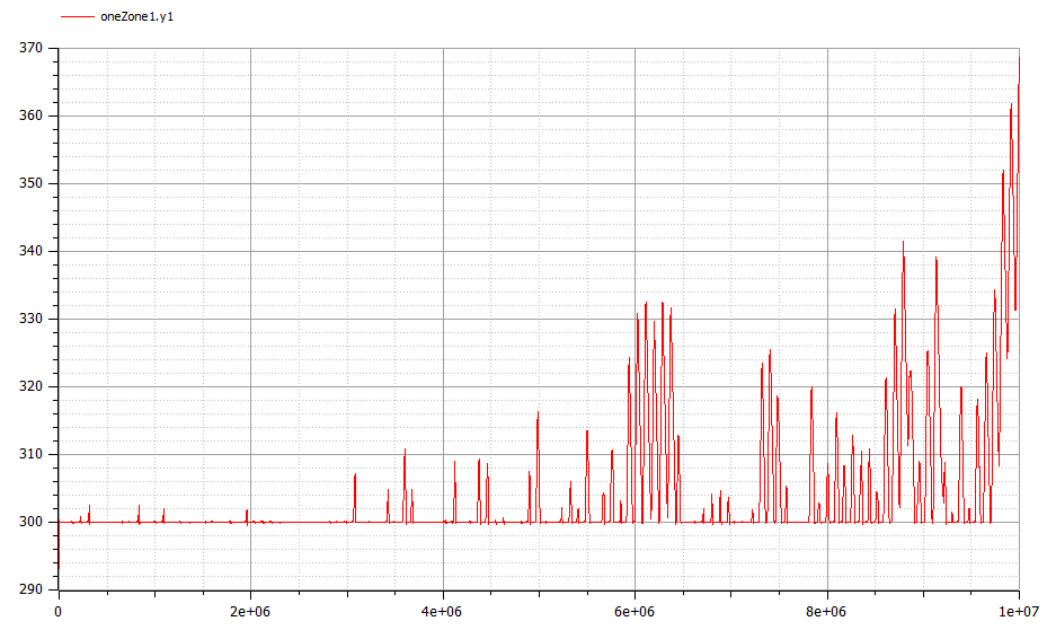


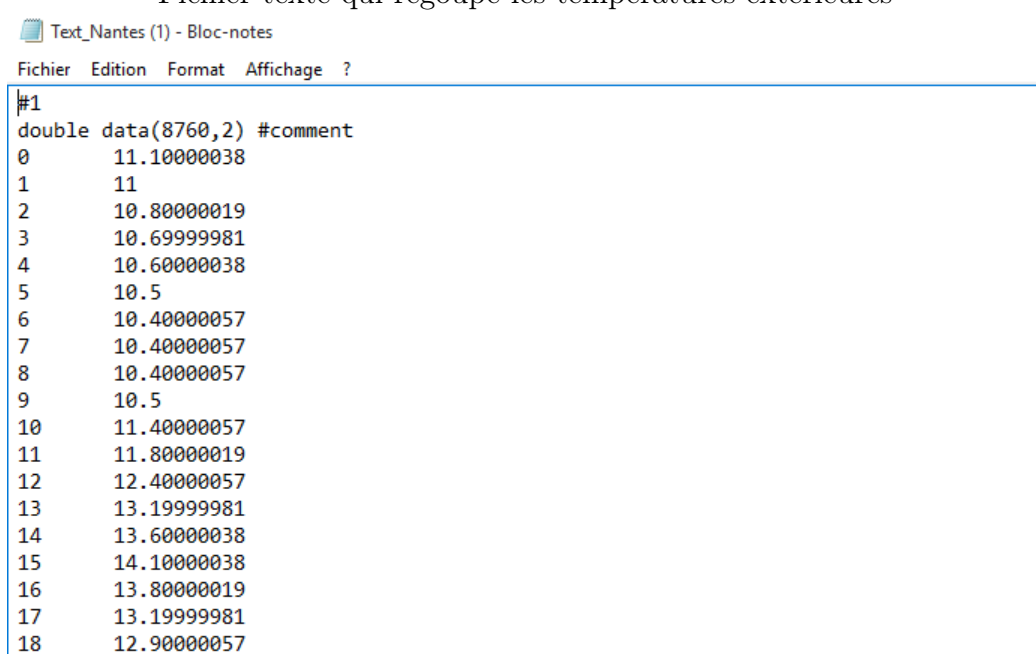
FIGURE 4.14 – Température de la zone d'air à long terme

### 4.3 Modélisation d'un parc de deux bâtiments par échange convectif

Le but de cette partie est de modéliser un parc de bâtiments couplés par échanges convectifs notre modèle cf figure 4.16 modélise deux

bâtiments couplés par des échanges convectifs sur chaque deux parois parallèles avec comme entrée une température consigne  $T_c=300K$ . Notre modèle prend en compte à la fois les effets radiatifs en prenant en compte les facteurs de formes entre deux parois en plus de l'effet de convection avec l'air extérieur qui va être couplé grâce à un conducteur thermique qui modélise l'effet convectif à une température fixe qui va prendre ses valeurs d'un fichier texte cf . figure 4.15 .

Fichier texte qui regroupe les températures extérieures

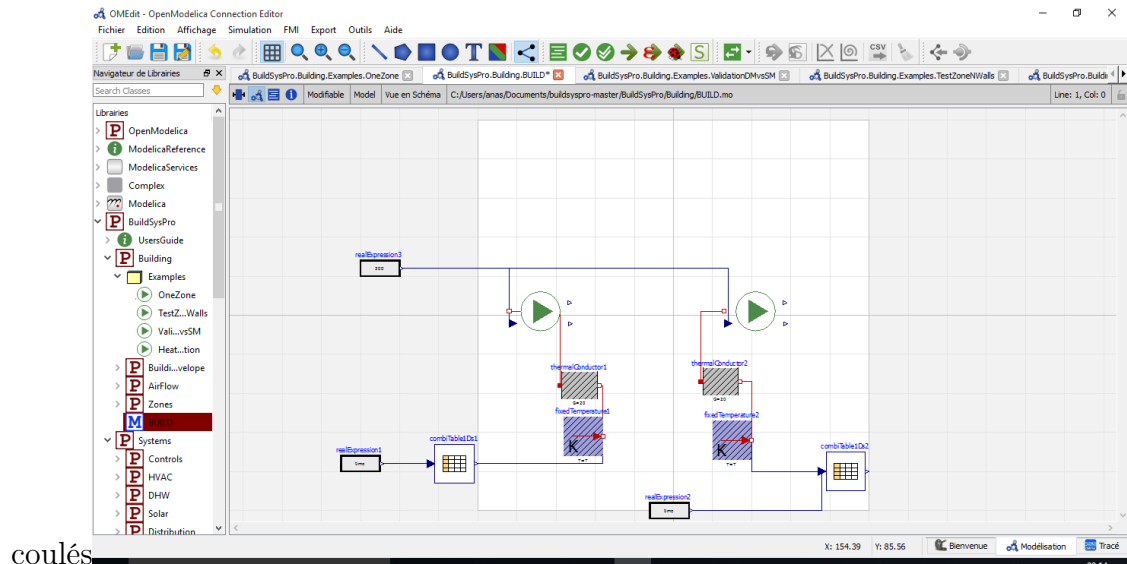


```
#1
double data(8760,2) #comment
0      11.10000038
1      11
2      10.80000019
3      10.69999981
4      10.60000038
5      10.5
6      10.40000057
7      10.40000057
8      10.40000057
9      10.5
10     11.40000057
11     11.80000019
12     12.40000057
13     13.19999981
14     13.60000038
15     14.10000038
16     13.80000019
17     13.19999981
18     12.90000057
```

FIGURE 4.15 – Température extérieure



Le modèle ci-dessous modélise deux bâtiments du quartier Ranzay à Nantes(CERMA) et qui représente précisément notre modèle d'étude à savoir l'étude des échanges thermiques par effet de convection entre ces deux bâtiments.

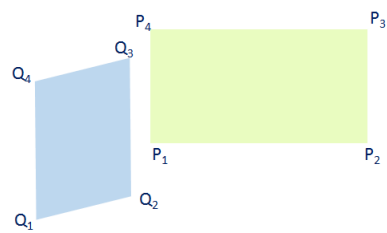
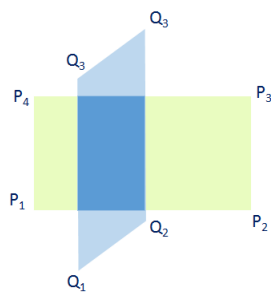
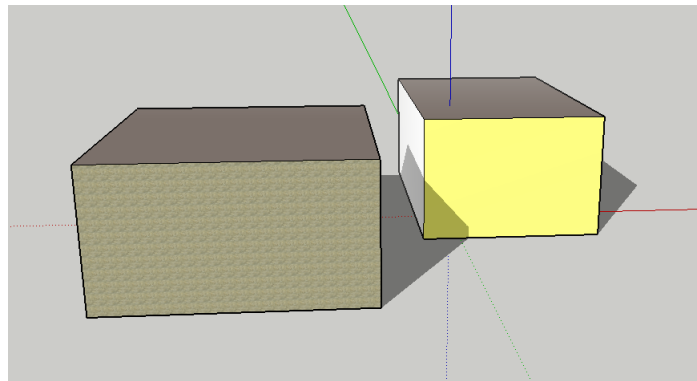


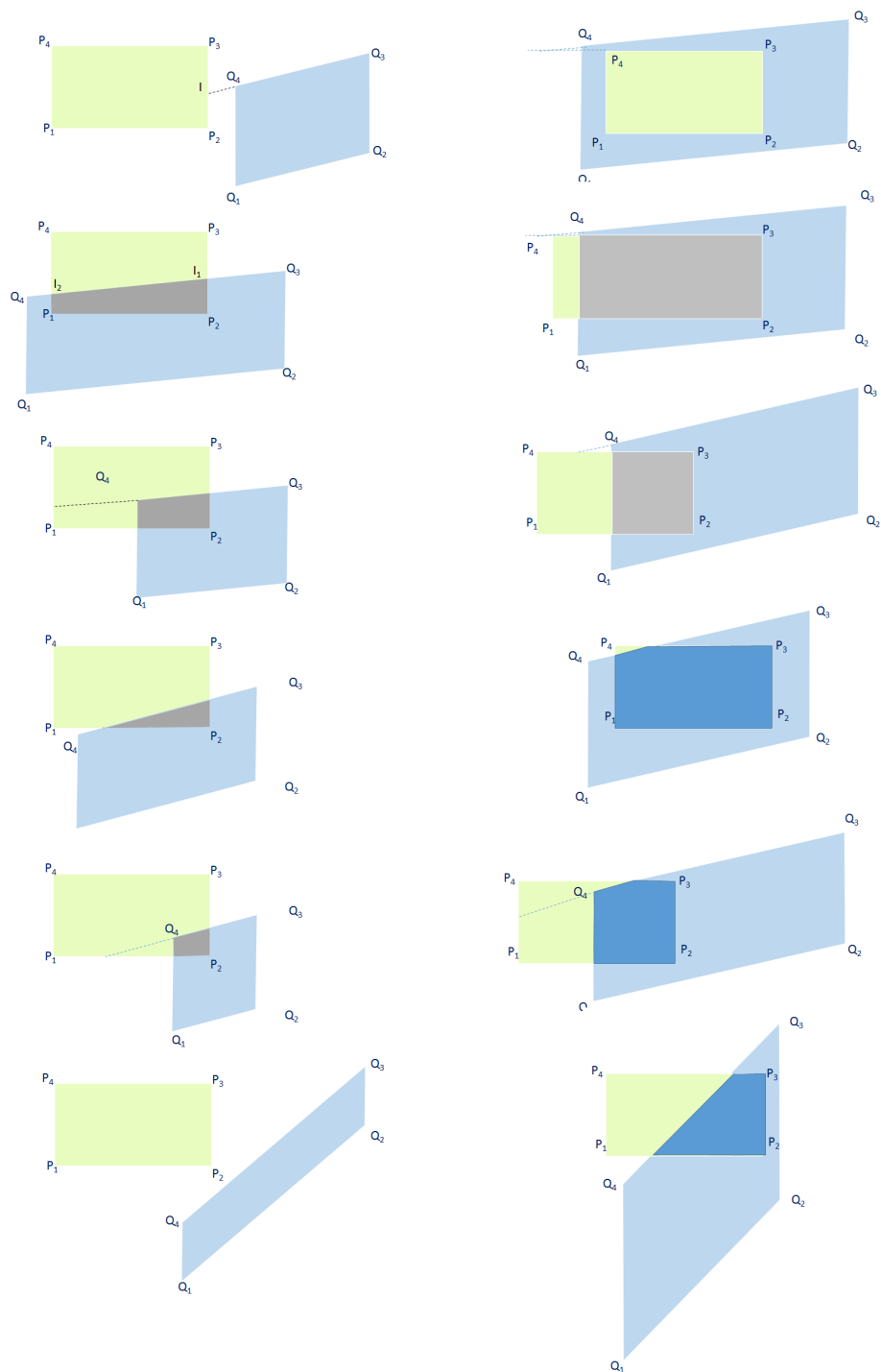
coulés

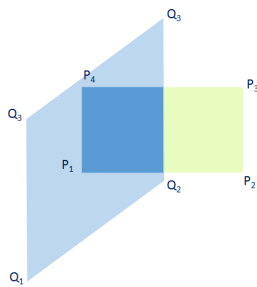
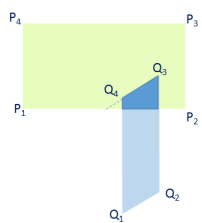
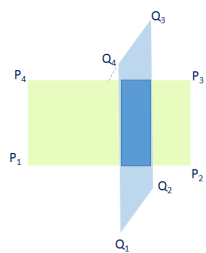
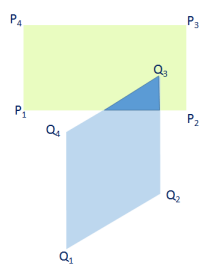
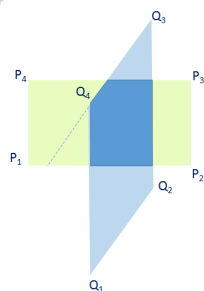
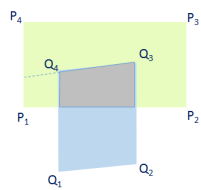
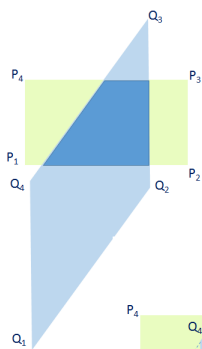
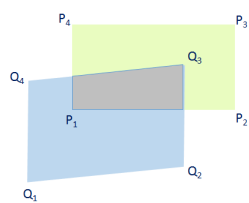
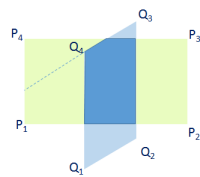
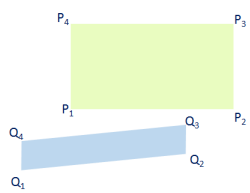
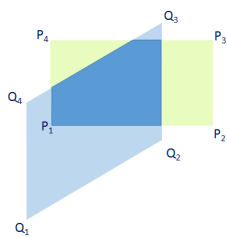
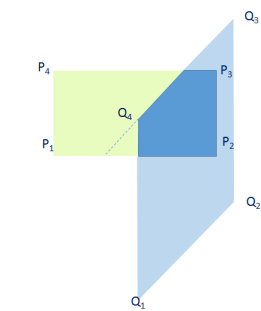
FIGURE 4.16 – Modèle des deux bâtiments couplés

# Annexe A

## Les configurations d'intersection







# Bibliographie

- [1] Castet H Bouia H, Covalet D. Mur trombe équipé d'un vitrage actif : étude des performances[j]. *Chauffage, ventilation, conditionnement d'air*, 2005.
- [2] Cardonnel C. C. solaire actif et passif[j]. conception, bilan thermique, habitat. *Les éditions parisiennes CFP*, 1983.
- [3] Verghese G Dahleh M, Dahleh M A. Lectures on dynamic systems and control[j]. *A + A*, 2004.
- [4] Dautin S Déqué F, Delille S. Réduction d'un système linéaire et invariant par la technique de moore. application à la thermique du bâtiment[j]. *Revue générale de thermique*, 2004.
- [5] Dautin S. Réduction de modèles thermiques de bâtiments : amélioration des techniques par modélisation des sollicitations météorologiques. *Poitiers*, 1997.