

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou- Bekr Belkaid Tlemcen

Faculté des Sciences – Département de Physique

Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables

Année 2010

THESE

Présentée pour obtenir

Le Grade de Docteur

Spécialité : **PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX**

Par

Nor REBAH ep BENRADOUANE

**MODELISATION DES ESTIMATIONS ENERGETIQUES
D' UNE MAISON PHOTO- SOLAIRE.
APPORT PHOTOTHERMIQUE SUR SITES DE
TLEMCCEN ET BOUZEREAH**

A soutenir à Tlemcen en Décembre 2010

Devant les membres du jury :

Président : **Prof. CHABANE SARI Nasr-Eddine**

U. Tlemcen

Directeur de thèse : **Prof. BENYOUCEF Boumediene**

U. Tlemcen

Examineurs :

BELHAMEL Maiouf

DR, CDER ALGER

CHAKER Abla

Prof., U. Constantine

CHARLES Jean- Pierre

Prof., U. Metz

BIBI TRIKI Nasr-Edinne

MC.A, U. Tlemcen

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*La Correction De L'erreur Est Peut Être L'événement
le Plus Sublime De La Vie Intellectuelle, Le Signe
Suprême De Notre Nécessaire Soumission à Une
Réalité Plus Vaste Et De Notre Incapacité à
Construire Le Monde Selon Nos Désirs*

J.Gould

À mon cher mari et mes filles

À toute ma famille

À mes amies

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Monsieur Boumediene BENYOUCEF, Professeur à l'université de Tlemcen et directeur de l'URMER pour son aide scientifique et surtout pour m'avoir soutenue, réconfortée, encouragée et pour avoir cru en moi dès le début de cette thèse, acceptez monsieur ma profonde reconnaissance .

Je suis honoré que Monsieur Nasr-Eddine CHABANE SARI, Professeur à l'Université de Tlemcen, ait accepté de participer et de présider ce jury. Je tiens à le remercier également pour son expertise dans plusieurs domaines abordés dans ce travail. Sa disponibilité quand j'ai eu besoin de lui et sa connaissance du milieu de la recherche qui m'ont beaucoup apporté

J'exprime toute ma gratitude à Mme Abla CHAKER Professeur à l'université de Constantine qui s'est intéressé à mon travail et m'a fait l'honneur d'être membre du jury.

Je tiens à remercier tout particulièrement Maiouf BELHAMEL directeur du CDER pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury

Que Monsieur Jean- Pierre CHARL professeur à l'université de Metz- France trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'honneur qu'il m'a fait en voulant bien accepter d'être membre du jury

Je remercie vivement Monsieur Nasr- Edinne BIBI TRIKI Maître de Conférence A, de l'université de Tlemcen qui m'a honoré en acceptant de faire partie des membres du jury

Enfin, il m'est agréable de remercier ici toutes les personnes de l'unité , chercheurs , enseignants et collègues qui par leur amitié leurs conseils m'ont permis de mener à bien ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 10

CHAPITRE I : BATIMENT THERMO- SOLAIRE 16

I- Introduction 17




II –Solutions pour la maîtrise des flux à travers l’enveloppe 18

- A. Les flux à travers l’enveloppe 18*
- B. Solutions pour la maîtrise du flux conductif 19*
- C. Solutions pour la maîtrise du flux solaire 22*
- D. Solutions pour la maîtrise du flux par renouvellement d’air 24*
- E. L’inertie thermique 25*
- F. Usages spécifiques à faible consommation 26*

III- La production d’énergie pour le bâtiment 27

A- Utilisation des énergies renouvelables 27

IV- Etude de cas 30

-  *Le bâtiment à énergie positive 30*
-  *Les concepts de bâtiments performants 31*
-  *Typologie des bâtiments performants 31*

a- Concepts purement énergétiques 32

1. Le bâtiment à basse consommation 32
2. Le bâtiment « passif » 32
3. Le bâtiment « producteur d’énergie » 33
4. Le bâtiment « zéro énergie » 33
5. Le bâtiment « à énergie positive » 33
6. Le bâtiment autonome 33

b- Concepts plus larges 34

1. « zero utility cost house » 34
2. « maison neutre en carbone » 34
3. Le bâtiment « vert » 35
4. Le bâtiment « intelligent » 35

V- Les critères d’évaluation propres aux bâtiments performants 35

- le besoin énergétique annuel de chauffage 36

SOMMAIRE

- la consommation d'énergie 36
- la production d'énergie 36
 - ❖ l'étanchéité du bâtiment à l'air 36
 - ❖ les performances des équipements et des matériaux mis en œuvre 36
 - ❖ des éléments non énergétiques 36

Synthèse 36

- 1- Définition du bâtiment à énergie positive 37
- 2- Discussion sur la définition proposée 39

VI- Exemple de réalisation de bâtiment performant 39

- 1- Immeuble d'habitation de Klosterenga (oslo, Norvège) 39
- 2- Rénovation de Logements sociaux à Mehrfamilienhäuser (Freiburg, Allemagne) 40
- 3- Bâtiment passif Wohnen & Arbeiten 41
- 4- Bâtiment passif ISIS (Freiburg, Allemagne) 42
- 5- Cité solaire du Schlierberg (Freiburg, Allemagne) 43
- 6- Maison à énergie positive de Fellbach (Fellbach, Allemagne) 44

Conclusion 45

CHAPITRE II : MODELES MATHEMATIQUE 46

I- Introduction 47

II- Modélisation 49

- Modèle de code de champ 49
- Les modèles monozones 50
- Les modèles multi- zones 50
- Les modèles zonaux 51
- Le choix du type de modélisation 51

III- RELATION INTERVENANT DANS LA MODELISATION THERMIQUE DE LA MAISON 52

1- les sollicitations climatiques 53

A- Les Sollicitations De Courtes Longueurs D'ondes (Clo) 53

SOMMAIRE

Problématique 53

B- Les Sollicitation De Grande Longueurs D'onde 54

2- Les sollicitations radiatives intérieures 55

a- la méthode des radiosités ou méthode exacte 55

1- température de surfaces connus 56

2- Flux nets connus 57

b- une méthode simplifiée 58

3 - Les transferts convectifs 59

1- convection forcée 59

2- convection a l'intérieur du bâtiment 60

4- Les transferts conductifs 61

- *conduction dans une paroi 62*

5- Bilan énergétique de surface des parois 64

6- Résolution du problème thermique 65

1. Introduction 65

2. Bilan thermo-convectif du noeud d'air 65

* *cas monozone 66*

* *cas multizone 67*

IV- RELATION INTERVENANT DANS LA MODELISATION DU TRANSFERT AERAULIQUE LA MAISON 68

1. Introduction 68

2- Les effets du vent 69

3- La modélisation des ouvertures 70

a- Introduction 70

b- Les petites ouvertures 71

4- Résolution du problème aéraulique 72

V- RELATION INTERVENANT DANS LA MODELISATION HYDRIQUES DE LA MAISON 73

1- Le modèle de paroi 75

2- Parois hygroscopiques 75

SOMMAIRE

a- Cas d'une paroi sèche 76

b- Cas d'une paroi humide 77

IV- COUPLAGE THERMO- AERO- HYDRIQUE 79

*** Couplage au niveau du bilan sensible du noeud d'air 79*

*** Couplage au niveau du bilan énergétique surfacique des parois 79*

Conclusion 79

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES 82

I- INTRODUCTION 83

II- DESCRIPTION DES PAROIS COMPLEXES 84

III- PRESENTATION DE QUELQUES PAROIS A COMPORTEMENT COMPLEXE 85

1. LE MUR TROMBE ET SES DERIVES 85

2- LE PRINCIPE DU BARDAGE THERMIQUE 87

3- LES SYSTEMES DE SURTOITURE TEXTILES [DUTA, 1998] 88

IV- MODELISATION DES PAROIS COMPLEXES 88

a- Les approches de modélisation dans la littérature 89

b- Synthèse 90

V - DEVELOPPEMENTS SPECIFIQUES AUX PAROIS COMPLEXES 91-

Hypothèses 91

► Le modèle thermique 92

- Concernant la conduction 92
- Concernant la convection intérieure 92
- Concernant le rayonnement 92
- Concernant le volume d'air 92

► Le modèle hydrique 92

► Le modèle aéraulique 93

A- LES TRANSFERTS RADIATIFS DE GRANDE LONGUEUR D'ONDE 93

➤ *LA METHODE DES RADIOSITES 93*

SOMMAIRE

* *INTEGRATION DE LA METHODE DES RADIOSITES 96*

- *La méthode couplée 96*
- *La méthode découplée 97*
- *La méthode décalée 97*

SYNTHESE 98

➤ ***LA METHODE DU COEFFICIENT D'ÉCHANGE GENERALISE 99***

🚦 *DEVELOPPEMENT THEORIQUE 99*

🚦 *PRELIMINAIRE : LA NOTION DE TEMPERATURE RADIANTE MOYENNE 100*

🚦 *LES FACTEURS DE FORME 100*

La méthode de Hottel 102

B- LES TRANSFERTS CONVECTIFS 104

1. PRESENTATION DES CORRELATIONS 104

- 1- *Corrélations retenues pour les cavités à grand nombre de Rayleigh 104*
- 2- *Corrélations retenues pour les cavités confinées 106*
 - *Corrélation « HEAT » 107*
 - *Corrélation « Ashrae » 108*

Conclusion 108

CHAPITR IV SIMULATION NUMERIQUE 110

I- Introduction 111

II- Les radiations solaires en Algérie 112

III- Estimation des radiations solaires pour des surfaces avec différente inclination et orientation 113

IV- Application du modèle dans la simulation numérique 115

- 1- *Résultat de la simulation 117*
- 2- *Discussion 125*

V- Comparaison et Validation 132

1- COMPARAISON 132

SOMMAIRE

2- VALIDATION DU MODELE 135

VI- Conclusion 137

CONCLUSION GENERALE 139

NOMENCLATURE 144

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE 145

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure 1 : Disposition des pièces d'un bâtiment en fonction de l'orientation 18

Figure 2 : Répartition moyenne des déperditions dans une maison individuelle neuve conforme à la RT2005 19

Figure 3 : Angle solaire en été et en hiver pour une façade sud 23

Figure 4 : Protections solaires fixes conçues pour favoriser l'éclairage naturel 23

Figure 5 : Principe de la technique de la fausse porte 24

Figure 6 : Irradiation solaire globale reçue par un plan incliné à la latitude du lieu 28

Figure 7 : Typologie de l'intégration des capteurs PV aux bâtiments 29

Figure 8 : Vue des logements de Klosterenga (Oslo, Norvège) 40

Figure 9 : Vue de la façade nord du bâtiment Mehrfamilienhäuser (Freiburg, Allemagne) 40

Figure 10 : Vue du bâtiment Wohnen & Arbeiten (Freiburg, Allemagne) 41

Figure 11 : Vue du bâtiment ISIS (Freiburg, Allemagne) 42

Figure 12 : Vue de la cité solaire du Schlierberg (Freiburg, Allemagne) 43

Figure 13 : Vue de la maison de Fellbach (Allemagne) 44

CHAPITRE II

Figure 1: Conduction à travers un mur bicouche 62

Figure 2 : Bilan énergétique de la surface 65

SOMMAIRE

Figure 3 : Synoptique de la résolution du problème thermique global d'une zone 67

Figure 4 : Formalisme du modèle de la paroi dans le cas hygroscopique 76

Figure 5 : La stratégie de couplage directe 81

CHAPITRE III

Figure 1 : Vue en coupe a) mur à effet de serre b) mur Trombe c) paroi héliodynamique 86

Figure 2 : Mur Trombe en configuration estivale 87

Figure 3 : Fonctionnement d'un bardage thermique, à gauche sans ventilation intérieure et à droite avec ventilation intérieure 88

Figure 4 : Synoptique de la méthode des radiosités couplée 96

Figure 5 : Synoptique de la méthode des radiosités découplée 97

Figure 6 : Synoptique de la méthode des radiosités décalée 97

Figure 7 : Illustration de la règle de Hottel 102

Figure 8 : Configurations de calcul des facteurs de forme 103

Figure 9 : Lampe d'air inclinée, chauffée par le haut 106

CHAPITRE IV

Figure 1 : Distribution des moyennes horaires des radiations solaires globales pour tout les mois de l'année à TLEMCEN 114

Figure 2 : Distribution des moyennes horaires des radiations solaires diffuses pour tout les mois de l'année à TLEMCEN 115

Figure 3 : Les radiations solaires incidentes sur une surface verticale orientée vers le sud 117

Figure 4 : Les radiations solaires incidentes sur une surface verticale orientée vers l'est 118

Figure 5 : Les radiations solaires incidentes sur une surface verticale orientée vers l'ouest 118

SOMMAIRE

Figure 6 : Les radiations solaires incidentes sur une surface verticale orientée vers le nord 119

Figure 7 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface verticale et fenêtre 2*2 m² orientation sud 119

Figure 8 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface verticale et fenêtre 2*2 m² orientation est 120

Figure 9 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface verticale et fenêtre 2*2 m² orientation ouest 120

Figure 10 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface verticale et fenêtre 2*2 m² orientation nord 121

Figure 11 : Les radiations solaires incidentes sur une surface inclinée (45°) orientée vers le sud 121

Figure 12 : Les radiations solaires incidentes sur une surface inclinée (45°) orientée vers l'est 122

Figure 13 : Les radiations solaires incidentes sur une surface inclinée (45°) orientée vers l'ouest 122

Figure 14 : Les radiations solaires incidentes sur une surface inclinée (45°) orientée vers le nord 123

Figure 15 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface inclinée (45°) et fenêtre 2*2 m² orientation sud 123

Figure 16 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface inclinée (45°) et fenêtre 2*2 m² orientation est 124

Figure 17 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface inclinée (45°) et fenêtre 2*2 m² orientation ouest 124

Figure 18 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface inclinée (45°) et fenêtre 2*2 m² orientation nord 125

Figure 19 : Comparaison de la demande énergétique de refroidissement entre les trois sites considéré orientation ouest 133

Figure 20 : Comparaison de la demande énergétique de refroidissement entre les trois sites considéré orientation est 133

SOMMAIRE

Figure 21 : Comparaison de la demande énergétique de refroidissement entre les trois sites considéré orientation sud 134

Figure 22 : Comparaison entre le modèle MEES et GSR application ville de Tamanrasset 135

Figure 23 : Comparaison entre le modèle MEES et GSR application ville de Tlemcen 136

Figure 24 : Comparaison entre le modèle MEES et GSR application ville d'Alger 136

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau 1 : Conductivité thermique λ de quelques matériaux d'isolation 20

Tableau 2 : Valeurs du coefficient de transmission surfacique de plusieurs types de vitrage 22

Tableau 3 : Eléments de la rénovation du bâtiment Mehrfamilienhäuser 41

Tableau 4 : Caractéristiques du bâtiment Wohnen & Arbeiten 42

Tableau 5 : Caractéristiques du bâtiment ISIS 42

Tableau 6 : Caractéristiques de la cité solaire du Schlierberg 43

Tableau 7 : Caractéristiques de la maison de Fellbach 44

CHAPITRE II

Tableau 1 : Coefficient de convection en fonction du vent 60

Tableau 2 : Les différents niveaux de finesse de la modélisation des coefficients convectifs intérieurs 61

CHAPITRE IV

Tableau 1 : Quelques caractéristiques des éléments principaux de l'enveloppe du bâtiment 116

Tableau 2 : Les besoins énergétiques de la climatisation (chauffage et refroidissement) mensuels et les transferts énergétiques à travers les petites ouvertures différentes inclinaisons et orientations 129



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

En ce début de millénaire, l'heure est propice aux bilans surtout sur le dernier siècle et le début de celui- là qualifier de technologique, voir matérialiste. Des termes surgissent couramment dans la littérature tant profane que spécialisée, notamment :

- Le développement économique et sa disparité mondiale
- Les ressources énergétiques et leur pérennité
- L'environnement et son devenir

Il n'est pas étonnant de regrouper ces mots car le développement économique, les ressources énergétiques et l'environnement sont inextricablement liés. En effet le développement économique entraîne des exigences grandissantes de la société dans sa course vers l'amélioration de son bien- être. En parallèle, une sensibilisation sur l'épuisement des ressources énergétiques se développent dans cette même société.

Le développement économique, avec une utilisation intensive et souvent mal gérée des énergies, met en péril notre environnement. En 2050, avec une population mondiale estimée entre 8 et 10 milliards, un doublement de la demande mondiale d'énergie est prévu. L'augmentation des consommations énergétiques est accompagnée de nombreuses incertitudes pesant sur les réserves connues d'énergies fossiles, en particulier le pétrole dont la durée est estimée à 50 ans. De grands efforts concernant l'efficacité énergétique et la promotion des énergies renouvelables doivent être faits pour éviter de futures crises énergétiques.

De l'autre coté Le changement climatique, avec ses importantes conséquences sur les écosystèmes de la planète, sera l'un des plus grands défis de l'humanité pour les cent prochaines années. Depuis deux siècles, l'influence de l'homme commence à modifier sensiblement le climat de la planète. Les émissions de certains gaz liés aux activités humaines ont intensifié le phénomène naturel de l'effet de serre et conduit à un réchauffement de la température sur terre. L'accroissement de la température moyenne de l'atmosphère est estimé entre +1,5 °C et +6,0 °C d'ici la fin du siècle suivant les actions internationales qui seront prises. Ceci risque d'avoir des

INTRODUCTION GENERALE

conséquences importantes et directes sur notre planète notamment au niveau de l'élévation du niveau des océans et la désertification.

Depuis les années 70, la communauté internationale s'est donc mobilisée pour résoudre ces problèmes, notamment pour limiter les concentrations dans l'atmosphère des gaz à effet de serre puisque plusieurs conférences internationales ont montré que l'influence de l'homme semble être un facteur dominant du réchauffement atmosphérique observé.

La remise en cause du modèle économique des pays industrialisés a été exprimée pour la première fois en 1968 lors de « l'Appel » du Club de Rome. En 1972, Un groupe d'intellectuels internationaux a publié le fameux « Halte à la croissance », pour affirmer la nécessité d'associer la protection de la nature au développement économique. Le premier sommet des Nations Unies sur l'homme et l'environnement a eu lieu la même année à Stockholm. Les chefs d'Etat et de gouvernement réunis ensuite à Paris décidèrent de la création d'une politique communautaire de l'environnement.

Le sommet de la terre organisé par les Nations Unies à Rio de Janeiro en 1992 a alerté l'opinion sur les conséquences du pillage des matières premières, sur l'augmentation inquiétante de l'effet de serre et sur la dégradation rapide et spectaculaire des équilibres écologiques. Au cours de ce sommet, l'Agenda 21 (appelé aussi Action 21) a été adopté et précise les objectifs à atteindre pour parvenir à un développement durable pour le XXI^{ème} siècle. La concrétisation des engagements pris à Rio s'appuie sur de nombreuses mesures touchant entre autres l'activité industrielle, les transports, la maîtrise de l'énergie et la gestion des déchets.

C'est le Protocole de Kyoto, en 1997, qui traduit en engagements quantitatifs juridiquement contraignants les volontés du sommet du Rio. Les pays développés dont les émissions de dioxyde de carbone représentaient en 1990 au moins 55% des émissions totales doivent s'efforcer de réduire l'écart entre eux et les pays en voie de développement.

INTRODUCTION GENERALE

Des étapes intermédiaires sont prises afin de résoudre les problèmes liés à la consommation d'énergie. Nous pouvons citer les étapes des « 3x20 » à l'horizon 2020, fixées par le Conseil Européen à savoir la réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre, la baisse de 20 % de la consommation énergétique, et l'utilisation de 20 % d'énergies renouvelables. Ces étapes ont été adoptées en France par exemple en 2007 par le Grenelle de l'environnement dans l'objectif d'une division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050.

Dans la perspective de respecter les engagements politiques dans le domaine environnemental et économique, le secteur du bâtiment a un énorme potentiel pour la réduction des consommations énergétique et des émissions des gaz à effet de serre. Dans ce secteur, les solutions sont très diverses et portent sur de nombreux postes (enveloppe, systèmes, usages spécifiques, etc.). Le choix entre eux est loin d'être simple. Des approches de choix basées sur les performances des alternatives et tenant compte d'un nombre important de paramètres s'avèrent indispensables.

Dans ce cadre, il est nécessaire de recourir à des solutions dites passives, dont le principe d'action utilise les moyens naturels. Ainsi, au départ d'une connaissance approfondie des phénomènes physiques auxquels est soumise l'enveloppe du bâtiment, il est possible de déterminer des solutions techniques simples et efficaces. L'expérience montre en outre qu'elles sont souvent inspirées des pratiques anciennes, remises au goût du jour afin de répondre aux contraintes actuelles.

Les parois complexes font partie de ces solutions et peuvent être décrites comme un assemblage donné de matériaux, intégrant notamment la présence de lame(s) d'air.

Elles sont le siège de phénomènes physiques couplés (thermique, aéraulique et hydrique) et sont destinées à exploiter certains phénomènes physiques afin de réguler le comportement énergétique d'une ambiance donnée ; l'effet de thermosiphon est par exemple mis à profit dans le mur trombe.

INTRODUCTION GENERALE

Compte tenu de leur principe d'action, de telles parois complexes doivent pouvoir être intégrées dans les outils de simulation du comportement énergétique des bâtiments afin que leur impact sur le comportement thermique des bâtiments puisse être mis en évidence. Or les transferts énergétiques dont elles sont le siège nécessitent, pour être traduits convenablement, l'utilisation de modèles fins et variés. La tendance actuelle de l'évolution des codes de simulation du comportement énergétique des bâtiments est celle d'une approche globale et intégrée, qui rend possible la démarche précédente.

Néanmoins, les logiciels de simulation ne comportent pas tous à l'heure actuelle les modèles permettant de prendre en compte les parois complexes. Il semble alors important d'initier une démarche en ce sens.

Ainsi, compte tenu de cette double problématique, liée d'une part à des considérations d'ordre réglementaire et d'autre part à des réoccupations scientifiques, notre travail est exposé en quatre parties :

Le premier chapitre est consacré à un état de l'art des bâtiments à basse consommation d'énergie à savoir des bâtiments thermo- solaire. Nous abordons ainsi des chiffres clés et quelques démarches politiques. Nous présentons ensuite plusieurs solutions relatives à l'enveloppe (isolation, étanchéité, récupération de chaleur, etc.) et les systèmes à énergie renouvelable et à haute efficacité. Ensuite, la réglementation thermique et les labels sont évoqués. Enfin, nous illustrons notre discours par quelques réalisations de bâtiments à basse consommation d'énergie.

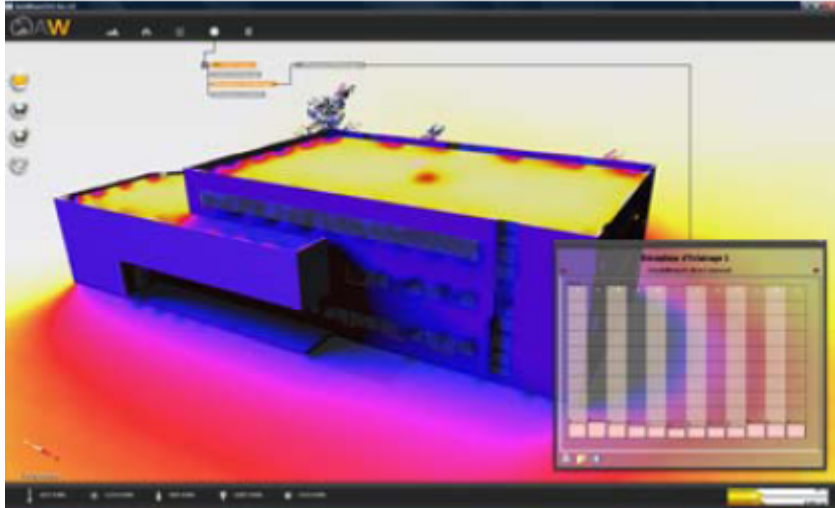
Le second chapitre intervient en préliminaire du chapitre 3, dédié au développement et à l'intégration de modèles dans un code de simulation du comportement énergétique des bâtiments. Nous avons tenu à situer le cadre de modélisation dans lequel nous nous plaçons. Nous rappelons ainsi dans le chapitre 2 le formalisme des phénomènes thermique, aéraulique et hydrique, utilisé dans les codes de simulation.

INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre présente les développements spécifiques qui ont été réalisés afin de rendre possible la description des parois complexes au départ. L'accent est porté sur les modèles radiatifs et convectifs, en respectant une approche d'intégration multi- modèle en vue d'une estimation des énergies solaires incidentes sur le bâtiment.

Le quatrième chapitre expose ensuite les résultats de la simulation numérique et donne l'estimation énergétique des énergies incidentes sur une maison à parois complexes, ainsi la validation globale, menée afin de vérifier les prédictions du code.

CHAPITRE I



BATIMENTS THERMO- SOLAIRES

Il existe une multitude de solutions pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments, tant pour l'enveloppe à savoir l'isolation, la réduction des ponts thermiques et la récupération de chaleur, que pour les systèmes (énergie renouvelable, haute efficacité) et les usages spécifiques.

Dans ce chapitre, nous abordons le contexte actuel, quelques opérations internationales, l'étude des solutions possibles, la réglementation et les labels pour mettre en œuvre ces solutions. Nous présentons également quelques bâtiments *à basse consommation d'énergie* afin de montrer la diversité des solutions et la nécessité de méthodes d'évaluation de leurs performances.

I- INTRODUCTION

Un bâtiment est un système complexe tant pour sa conception que pour son fonctionnement. Tous les éléments dont l'environnement, l'enveloppe, les installations techniques et les activités des occupants, interagissent. Le bon fonctionnement du bâtiment doit répondre à plusieurs exigences dont les besoins (eau chaude sanitaire, usage spécifique, qualité de l'air,..) et le confort (thermique, acoustique, visuel...) des usagers [HDR Ghiaus].

D'un point de vue énergétique, le but est de minimiser les besoins tout en gardant une bonne ambiance intérieure.

La conception du bâtiment commence par le choix du terrain. De ce choix découlent la localisation, l'orientation, l'aménagement, la valeur foncière. Une fois le terrain choisi, l'effort porte sur l'architecture du bâtiment.

L'architecture passive permet de concevoir les bâtiments de manière à ce qu'ils respectent l'environnement. Cela comprend par exemple des concepts tels qu'une faible consommation énergétique, l'utilisation de matériaux sains et écologiques et le recourt aux énergies renouvelables. Le but est aussi de concevoir un bâtiment respectueux de son environnement mais aussi plus sain et plus confortable.

Quelques principes de base de l'architecture climatique sont :

- Se protéger des vents dominants : bâtiments compacts, création d'espaces intérieurs tampons, végétation persistante au nord, emplacement des ouvertures ;
- Orientation et organisation des espaces à vivre et des espaces extérieurs permettant à la fois de :
 - Profiter de l'ensoleillement hivernal : baies vitrées verticales au sud ou sud-est, exposition des pièces principales sud-est à sud-ouest ;
 - Eviter les surchauffes d'été : protection des baies (volets, stores, casquettes), végétation à feuilles caduques au sud, isolation extérieure ;
 - Stocker et restituer : utilisation de matériaux lourds 'stockeurs de chaleur', isolation des baies vitrées...

La Figure 1 donne à titre d'exemple, une organisation des pièces d'un logement qui répond aux exigences citées ci-dessus. Les pièces à vivre sont orientées de préférence au sud, les pièces secondaires et les espaces de rangement sont plutôt orientés nord.

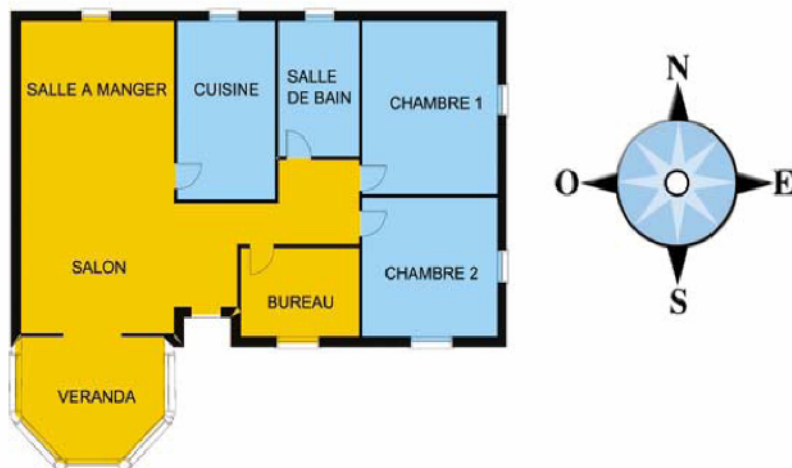


Figure 1 : Disposition des pièces d'un bâtiment en fonction de l'orientation [ADEME]

II –SOLUTIONS POUR LA MAITRISE DES FLUX A TRAVERS L'ENVELOPPE

A- Les flux à travers l'enveloppe

L'enveloppe d'un bâtiment, comprend les murs, le plancher, la toiture, les fenêtres et les portes. Elle est caractérisée par de nombreux paramètres fonctionnels dont les principaux sont :

- Isolation thermique et acoustique (parois opaques et parois vitrées) ;
- Etanchéité à l'eau et à l'air ;
- Comportement par rapport aux apports solaires (hiver et été) ;
- Inertie thermique ;
- Eclairage naturel des locaux ;
- Qualité de l'air intérieur ;
- Intégration dans l'environnement.

Le flux thermique peut être classé en trois grandes catégories : conductif, radiatif, et convectif. La répartition des déperditions dans une maison individuelle neuve respectant la réglementation thermique RT2005 par exemple est donnée dans la Figure 2 [R - thermique 2005] :

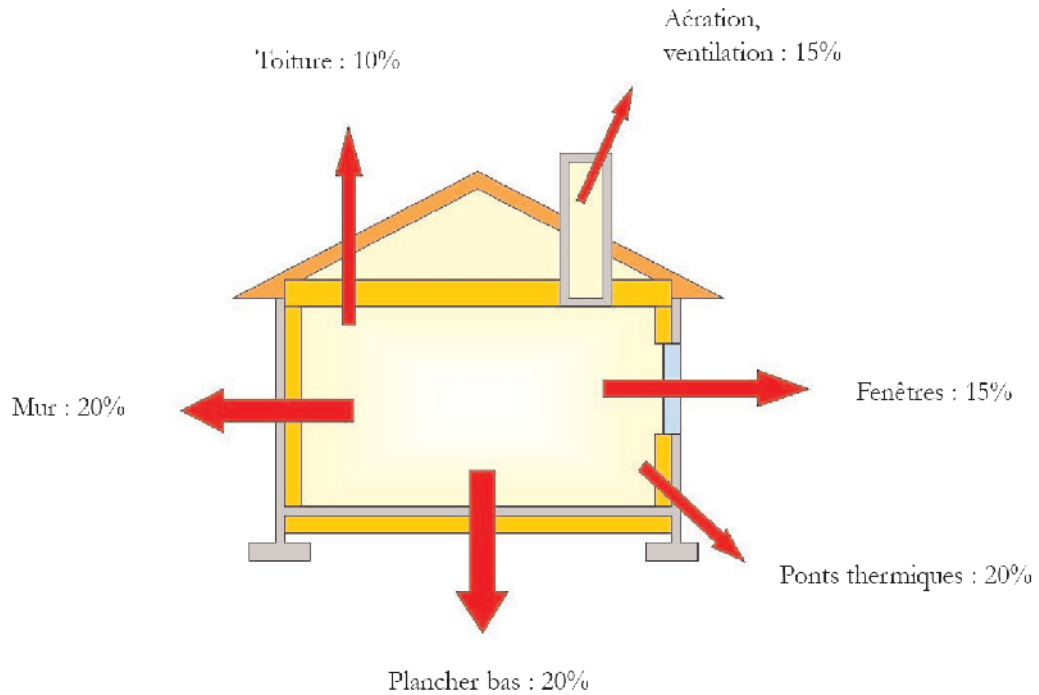


Figure 2 : Répartition moyenne des déperditions dans une maison individuelle neuve conforme à la RT2005 [R- thermique 2005]

B- Solutions pour la maîtrise du flux conductif

Les flux de chaleur conductifs à travers l’enveloppe peuvent être influencés par les paramètres suivants :

- coefficient de transmission surfacique U (W/m^2K) ;
- Le coefficient de transmission linéique des ponts thermiques Ψ (W/mK) ;
- La surface S (m^2) ;
- La longueur des ponts thermiques L (m).

Les efforts portent sur la réduction de ces 4 paramètres et principalement U et Ψ . La réduction de S et de L relève principalement de la conception architecturale.

Pour la réduction de U , l'amélioration de l'isolation thermique des parois demeure une solution rentable pour diminuer la consommation énergétique d'un bâtiment. Cela passe par l'augmentation des résistances thermiques des éléments constituant la paroi. En règle générale, il s'agit d'augmenter l'épaisseur des matériaux et de sélectionner des isolants très performants, c'est-à-dire à faible conductivité thermique. La réduction de Ψ est essentiellement liée à des dispositions constructives.

Pour S et L , il est important que le bâtiment soit assez compact, ceci limite les surfaces en contact avec l'extérieur et les longueurs des jonctions entre les parois.

Avec le renforcement des réglementations thermiques en Europe, l'épaisseur des isolants a régulièrement augmenté au cours des dernières années. Quant à la conductivité thermique des matériaux, elle atteint aujourd'hui ses limites pour les produits isolants traditionnels (laines minérales, polystyrènes expansés...). Ainsi les meilleurs isolants certifiés offrent une conductivité thermique λ proche de 0,025 W/mK. Dans le Tableau 1 nous présentons les valeurs de la conductivité thermique de quelques matériaux d'isolation disponible.

Matériau	Conductivité thermique λ (W/mK)
Laine minérale (Laine de roche)	0,037
Verre multicellulaire	0,042
Perlite	0,050
Polystyrène extrudé	0,028
Polyuréthane	0,025
Polystyrène expansé	0,040
Liège	0,044

Tableau 1 : Conductivité thermique λ de quelques matériaux d'isolation

Cependant, il commence à apparaître des panneaux isolants sous vide qui sont des produits à haute performance. Ils utilisent les principes de la basse pression et du confinement pour réduire le nombre et la mobilité des molécules de gaz. Pour ces matériaux des valeurs de conductivité thermique proche de 5 mW/mK sont annoncées [SS CHANDEL 2008].

Un pont thermique est une zone localisée à faible résistance thermique et se situe généralement au niveau du plancher des bâtiments, des encadrements de baies, des liaisons mur-plancher ou mur-toiture, des avant-toits en saillie, des balcons et autres éléments traversant.

Il existe trois principes généraux pour isoler l'enveloppe d'un bâtiment, à savoir :

- Isolation par l'intérieur ;
- Isolation répartie ;
- Isolation par l'extérieur.

Le premier principe est en général le moins performant vis à vis des ponts thermiques. Le deuxième principe est le plus performant et de plus, il augmente sensiblement l'inertie thermique du bâtiment si les parois sont lourdes. Par contre, l'isolation par l'extérieur est plus coûteuse que celle par l'intérieur et peu poser des problèmes de tenue dans le temps. En général, les maisons passives privilégient l'isolation par l'extérieur.

Il existe d'autres solutions pour réduire les pertes par les ponts thermiques. Par exemple, pour les balcons, ils peuvent être conçus de manière à ce qu'ils soient auto-porteurs et fixés ponctuellement au mur à isolation extérieure. On peut également avoir recours à des rupteurs de ponts thermiques.

Dans le cas de parois transparentes, le facteur de transmission surfacique U a été diminué d'un facteur 6 en 30 ans. Tout d'abord grâce à l'introduction du double vitrage pour réduire les pertes par conduction puis des revêtements dits à « basse émissivité » pour limiter les pertes par rayonnement infrarouge. Enfin, l'utilisation de gaz rares (argon ou krypton) ou la mise sous vide de la « lame d'air » permet d'augmenter sensiblement les

performances. Ces performances restent malgré tout encore loin de celles atteintes pour les parois opaques (voir Tableau 2). Le coefficient de transmission surfacique total d'une paroi vitrée dépend également de la performance du cadre (aluminium, bois, PVC ...).

Type de vitrage	U (W/m ² K)
Simple vitrage	5,7
Double vitrage verre clair + air	2,9
Triple vitrage verre clair + air	2,3
Double vitrage + couche basse émissivité	1,8
Double vitrage + couche basse émissivité + argon	1,3
Triple vitrage + deux couches à basse émissivité	0,7
Rappel : pour 10 cm d'un isolant traditionnel	0,4

Tableau 2 : Valeurs du coefficient de transmission surfacique de plusieurs types de vitrage

C- Solutions pour la maîtrise du flux solaire

La maîtrise du flux solaire à travers l'enveloppe est primordiale dès la conception pour garantir un éclairage naturel adapté aux besoins des occupants, en particulier la vision sur l'extérieur, et pour les apports gratuits en hiver mais également pour éviter les surchauffes en été et l'éblouissement.

L'enseillement se décompose en deux caractéristiques principales : la trajectoire du soleil et la durée d'exposition. Elles dépendent de la position du soleil qui change selon les saisons et déterminent les apports solaires. L'exposition du bâtiment, l'orientation des pièces intérieures, l'emplacement des fenêtres et la végétation doivent être déterminés en fonction de l'enseillement. L'été, le soleil se situe haut dans le ciel, alors que pendant l'hiver le soleil est bas et reste visible moins longtemps.

En prenant en considération les angles solaires en été et en hiver, les fenêtres orientées sud peuvent transmettre un maximum de rayonnement solaire en hiver, ce qui favorise

l'utilisation des gains solaires, tout en limitant les pénétrations estivales et les surchauffes qu'elles induisent (Figure 3). En été, les masques et les protections solaires naturels ou artificiels au niveau de la façade sud limitent la pénétration du rayonnement solaire et évitent les surchauffes. Ces protections solaires peuvent être de plusieurs types : éléments architecturaux fixes (Figure 4), mobiles (casquette, brise soleil...) ou stores qu'ils soient intérieurs ou extérieurs.



Figure 3 : Angle solaire en été et en hiver pour une façade sud [ADEME]



Figure 4 : Protections solaires fixes conçues pour favoriser l'éclairage naturel
[outil-solaire]

D- Solutions pour la maîtrise du flux par renouvellement d'air

La perméabilité à l'air de l'enveloppe est un élément très pénalisant pour les pertes. Ceci induit non seulement des surconsommations d'énergie mais également des problèmes de qualité de l'air intérieur, de confort thermique et acoustique [Germano 2006].

Si les ouvrants constituaient dans le passé les principaux points faibles vis à vis de la perméabilité à l'air des bâtiments, les progrès réalisés à ce niveau font ressortir maintenant d'autres points faibles tels que les prises de courant ou les stores des volets roulants, sur lesquels doivent porter les efforts.

Une fois réalisée, l'étanchéité de l'enveloppe peut être mesurée en utilisant par exemple la méthode de la fausse porte « Blower Door ». Cette méthode est illustrée par la Figure 5

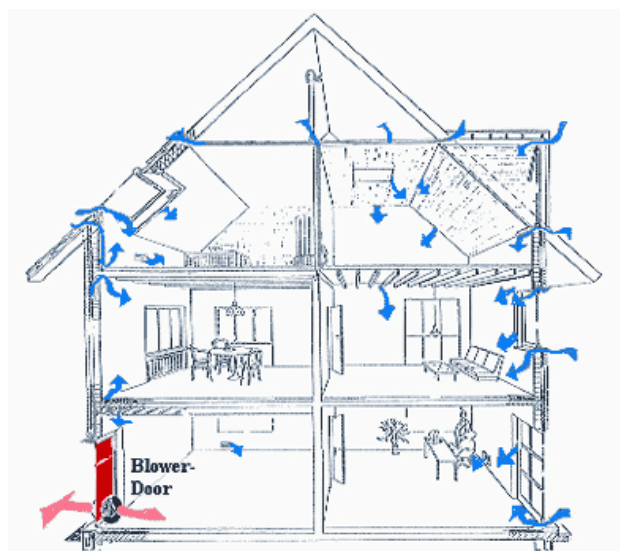


Figure 5 : Principe de la technique de la fausse porte [blower-door-test]

Dans les bâtiments, la ventilation répond avant tout à un besoin d'hygiène et de santé des occupants :

- apport d'air neuf pour la respiration ;
- élimination des pollutions intérieures liées à la présence et aux activités humaines.

La conservation du bâti nécessite également une aération maîtrisée pour éviter en particulier des humidités excessives. Il existe deux grands principes pour la ventilation des locaux : la ventilation naturelle et la ventilation mécanique.

Pour la ventilation naturelle, on peut citer l'aération par ouverture des fenêtres et par conduits à tirage naturel. Pour la ventilation mécanique, on peut évoquer la ventilation mécanique simple flux par extraction d'air, communément appelée VMC qui utilise des entrées d'air neuf dans les pièces principales et des bouches de sortie d'air vicié dans les pièces de service. La ventilation mécanique double flux avec un échangeur (VMC double flux) est un système de ventilation par insufflation et extraction mécanique centralisé comprenant un groupe de ventilation et de récupération de chaleur, un réseau d'insufflation d'air neuf et un réseau d'extraction d'air vicié. L'air neuf, capté par une prise d'air extérieur située en dehors de toute zone de pollution, passe à travers l'échangeur de chaleur avant d'être insufflé dans les pièces principales par l'intermédiaire d'un réseau de conduits. Même si elle est plus coûteuse qu'un système simple flux, une VMC double flux permet de récupérer jusqu'à 90 % de l'énergie de l'air extrait pour les systèmes les plus performants [Feist 2005].

E- L'inertie thermique

Dans un bâtiment, avoir une température stable est un élément important pour le confort. Plus les éléments du bâtiment sont "lourds" et donc capables de stocker de l'énergie thermique, plus la température aura tendance à rester stable. L'effet de la masse thermique est associé à l'effet de la résistance thermique pour limiter la diffusion de chaleur à travers les parois. Par exemple, les anciennes maisons avec des murs épais restent fraîches en été,

Dans une construction isolée seule la masse située du côté intérieur de l'enveloppe isolante contribue à une forte inertie, si on considère comme perturbation la température intérieure. Il est à noter que la position de l'isolant (extérieure, intérieure ou répartie) n'influe pas sur le niveau de l'isolation.

Ainsi, un bâtiment avec une forte inertie permettra de diminuer les surchauffes d'été et en demi-saison, d'accumuler la chaleur reçue par le rayonnement solaire pendant la

journée pour la restituer le soir. Pour la construction en France par exemple, la réglementation thermique RT2005 propose des classes d'inertie des bâtiments de très légère à très lourde [CSTB, 2006].

De nombreux bâtiments modernes sont construits avec des structures légères, ce qui conduit à une faible inertie. De plus, une grande partie de l'enveloppe peut-être vitrée engendrant des apports solaires importants. Il est alors possible d'utiliser des matériaux à changement de phase (MCP) qui peuvent absorber ou libérer une grande quantité de chaleur au cours de leur changement de phase de liquide à solide et inversement. Un exemple de rafraîchissement passif à l'aide de matériaux à changement de phase est donné dans [Chlela 2008].

F- Usages spécifiques à faible consommation

L'idée est d'utiliser des appareils électroménagers et des lampes à basse consommation électrique. Grâce aux étiquettes obligatoires affichant les consommations pour les appareils électroménagers et l'éclairage, il est possible de choisir un matériel à faible consommation énergétique.

L'étiquette Energie obligatoire pour la plupart des appareils (ampoules, réfrigérateurs) classe les appareils de A (performants) à G (énergivores) en fonction de leur efficacité énergétique. L'étiquette indique aussi en clair la consommation normalisée de l'appareil. Il existe maintenant des appareils classés A+ et même A++ dont les performances sont encore meilleures.

Pour l'éclairage, les lampes fluorescentes aussi appelées lampes à basse consommation sont des tubes fluorescents émettant de la lumière. Elles sont caractérisées par une faible consommation énergétique et une longue durée de vie à savoir jusqu'à 10 fois plus longue que les lampes à incandescence, et ceci avec une meilleure efficacité lumineuse.

III- LA PRODUCTION D'ENERGIE POUR LE BATIMENT

Lors de la construction d'une maison, il faut penser à la fourniture d'énergie pour couvrir ses besoins en électricité, chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage, etc.

La production rationnelle d'énergie pour le bâtiment, va de pair avec une utilisation rationnelle de l'énergie liée d'une part à la performance des enveloppes des bâtiments et d'autre part à la maîtrise de tous les usages des différentes énergies dans les bâtiments.

A- Utilisation des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables constituent une solution respectueuse de l'environnement. Elles permettent d'acquérir une certaine autonomie énergétique et de réaliser des économies à moyen et long terme.

Les énergies renouvelables sont inépuisables (soleil, vent, eau, biomasse...) à l'opposé des réserves d'énergies fossiles (pétrole, gaz) et fissiles (uranium) qui s'épuisent. En fonction de la situation géographique, plusieurs types d'énergies renouvelables sont utilisables : l'éolien, la biomasse, l'hydraulique, le solaire (photovoltaïque et thermique) et la géothermie.

Le bois est une source d'énergie naturelle, renouvelable et disponible. C'est l'une des sources d'énergie les plus anciennement utilisées par l'humanité. Il ne contient pas de soufre et ne libère dans l'atmosphère que le carbone qu'il a accumulé durant la croissance. Le bois énergie est un élément important du développement durable, à condition d'utiliser des appareils performants (chaudières, poêles,...) et du bois de qualité qu'il soit en plaquettes ou en granulés. D'un point de vue environnemental, les émissions de CO₂ sont neutres vis-à-vis de l'effet de serre car globalement le carbone émis est recapté pour la croissance des arbres replantés.

L'énergie solaire est la plus disponible en Algérie. Dans le nord de l'Algérie, elle peut couvrir de 60 à 70% des besoins en eau chaude sanitaire et à plus de 100% dans la moitié sud du pays. La Figure 6 présente l'irradiation solaire moyenne annuel de l'Algérie

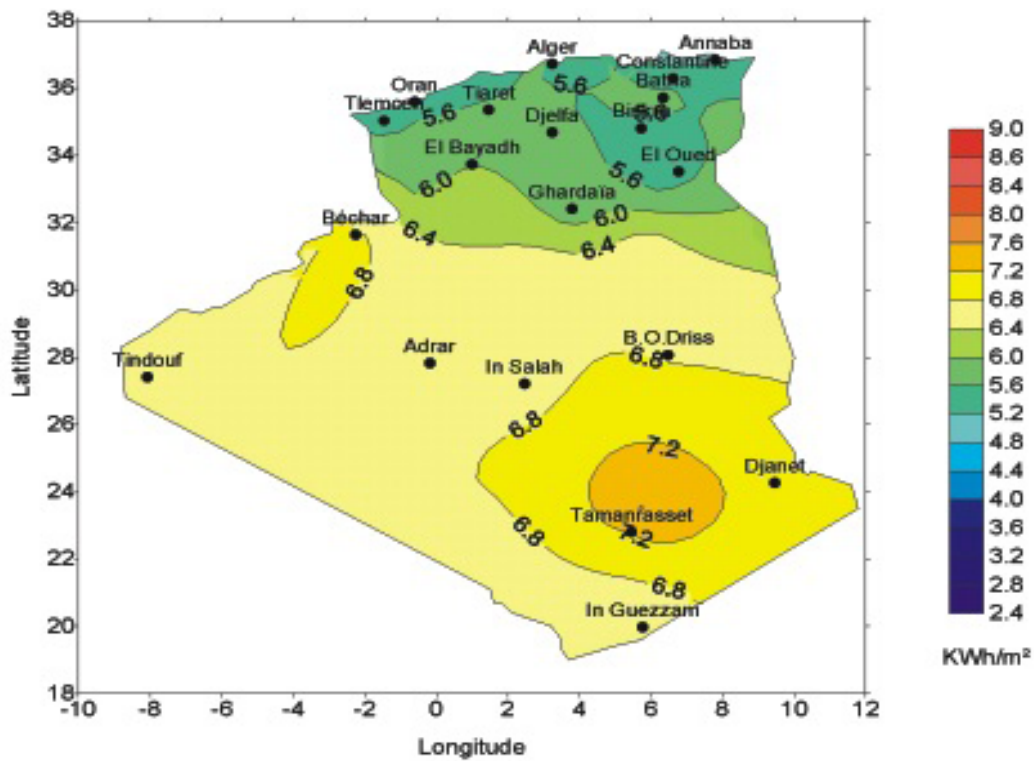


Figure 6 : Irradiation solaire globale reçue par un plan incliné à la latitude du lieu [météo dz]

L’utilisation de l’énergie solaire dans le bâtiment peut a priori se diviser en deux parties : thermique et photovoltaïque. Les principales utilisations de l’énergie solaire thermique sont le chauffe-eau solaire et le chauffage solaire. Le principe est très simple : utiliser la chaleur du soleil pour chauffer l’eau du système de chauffage et l’eau chaude sanitaire. Il existe différents types de capteurs solaires thermiques:

- Capteurs plans sans vitrage ;
- Capteurs plans à simple ou double vitrage ;
- Capteurs à tubes sous vide.

La voie la plus intéressante à court terme pour le solaire photovoltaïque est celle de l’intégration au bâti, le module PV ayant alors une seconde fonction (couverture étanche, verrière translucide, brise-soleil). Il peut être aussi combiné à un capteur thermique à air ou à eau (Capteur hybride PV/ Thermique).

L'électricité fournie par les panneaux photovoltaïques peut être utilisée, par exemple, pour faire fonctionner le système de gestion technique du bâtiment (moteurs de volets roulant ou de stores, ouvertures pour la ventilation, ordinateur de l'unité de commande ...), certains appareils ménagers ou équipements électroniques et audio-visuels. Elle peut également être renvoyée sur le réseau électrique.

En France par exemple, un panneau d'une superficie de 10 m², soit 1 kWc, permet de produire en moyenne 1 000 kWh électrique par an pour une inclinaison et une orientation optimale. Le rendement est plus faible, de 20 à 30 %, si les panneaux sont intégrés aux façades [Guiavarch 2003].

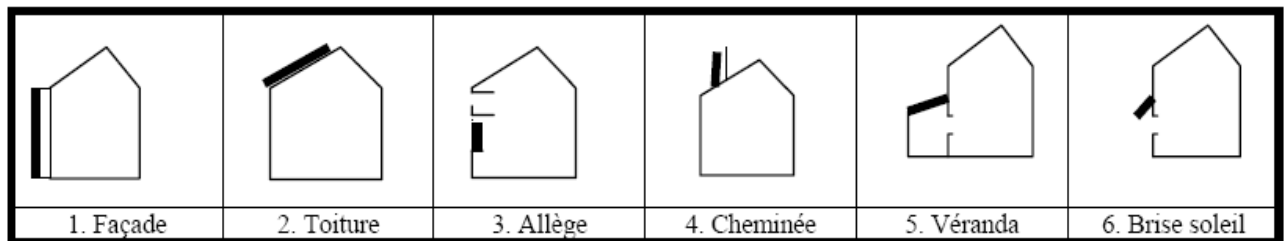


Figure 7 : Typologie de l'intégration des capteurs PV aux bâtiments [Guiavarch 2003]

La géothermie consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou d'électricité. L'énergie géothermique ou chaleur du sous-sol est l'énergie calorifique stockée sous la surface terrestre. Les profondeurs de la terre recèlent d'énormes quantités de chaleur naturelle.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer.

Le système le plus simple est le puits canadien appelé aussi puits provençal, c'est un système qui consiste à faire passer, avant qu'il ne pénètre dans le logement, une partie de l'air neuf par des tuyaux enterrés dans le sol, à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 m.

Le sol est à une température plus modérée que l'air extérieur que ce soit en hiver ou en été. Un modèle de ce système est présenté dans [Chlela 2008].

L'éolien urbain sont des systèmes de production d'énergie éolienne spécialement adaptés à l'environnement urbain. L'environnement urbain est particulièrement difficile pour la production d'énergie éolienne : vent turbulent avec des variations rapides et localisées de la vitesse et de la direction, sites d'implantation difficiles d'accès et peu adaptés à l'installation d'une éolienne. Cependant, le potentiel est important et la production est au plus près de l'utilisation.

Comme le cas du photovoltaïque, l'électricité produite peut être réinjectée dans le réseau ou stockée dans des batteries pour être utilisée selon les besoins. Techniquement et économiquement, la première solution est la plus pertinente sauf s'il s'agit d'un site isolé. Une éolienne présente l'avantage sur le photovoltaïque qu'elle produit de l'énergie de jour comme de nuit mais il est nécessaire que le lieu soit suffisamment exposé au vent.

IV- ETUDE DE CAS

Le bâtiment à énergie positive

Parmi les nombreux concepts de bâtiments performants, le **bâtiment à énergie positive** est parmi les plus récents [Disch 2008]. En raison de son haut niveau d'exigence, aucune réglementation et aucun standard ne l'ont encore intégré et sa définition n'est donc pas encore clairement établie.

Identifier les spécificités de ce concept et en proposer une définition est nécessaire et passe notamment par l'analyse des principaux concepts de bâtiments performants existants. L'examen de quelques réalisations correspondant à ces concepts va permettre d'en identifier les éléments techniques (solutions architecturales, méthodes constructives, équipements) les plus adaptés.

Finalement, compte tenu des objectifs du bâtiment à énergie positive, il est possible de retenir un certain nombre de solutions techniques éprouvées ou disponibles à court terme qui pourra constituer un bâtiment à énergie positive.

Les concepts de bâtiments performants

Un concept de bâtiment performant est défini par un ensemble d'objectifs et de solutions techniques destinés à guider le concepteur. Ce dernier, en s'appuyant sur divers outils d'aide à la conception, associe des techniques, matériaux, structures et équipements de manière à atteindre au mieux les objectifs fixés. Enfin, après la mise en service du bâtiment, une phase d'évaluation permet au concepteur et au maître d'ouvrage de quantifier les performances réelles du bâtiment et de les comparer aux objectifs originaux.

Dans cette partie, l'analyse de différentes définitions et dénominations rencontrées dans la littérature amène à proposer une typologie des principaux concepts de bâtiments performants et à en identifier les principales caractéristiques.

Typologie des bâtiments performants

Les concepts de bâtiments performants se trouvent le plus souvent définis dans le cadre de certifications, de labels ou de réglementations. Ils sont alors associés à un cahier des charges décrivant leurs objectifs ou à une méthode d'évaluation de leur niveau de performance. Leurs dénominations sont variées, chacune mettant l'accent sur une caractéristique majeure du bâtiment.

Pourtant le concept sous-jacent ne se résume pas à cette simple caractéristique ; ces dénominations sont nécessairement réductrices. Une typologie des dénominations rencontrées dans la littérature a été réalisée, de manière à faire ressortir les principales caractéristiques de ces bâtiments et les principaux concepts associés. Deux types d'approches se distinguent : des *approches purement énergétiques* et des *approches plus larges* [Boyer 2010].

a- Concepts purement énergétiques

Les concepts purement énergétiques accompagnent des réglementations visant la performance énergétique des bâtiments (*Réglementation Thermique 2005* [JORF 2006] en France, réglementation *Energieeinsparverordnung* [EnEV 2004] en Allemagne) ou sont simplement associées à des labels (*Minergie®* en Suisse¹ [Minergie 2008], *Passivhaus* en Allemagne [Passivhaus 2008], *CasaClima/Klimahaus* en Italie [Klimahaus 2008]). En France, la réglementation propose cinq labels (*HPE, THPE, HPE EnR, THPE EnR* et *BBC 2005*)², soit plusieurs niveaux de performance différents, et incite à l'intégration de sources d'énergies renouvelables au bâtiment [JORF 2007].

Pour ces approches, les critères évalués sont peu nombreux, bien définis et quantifiables ce qui facilite l'identification des concepts sous-jacents. Ceux qui ont été identifiés sont les suivants :

1- Le bâtiment à basse consommation ou « basse énergie » (en anglais : low energy house)

Ce bâtiment se caractérise par des besoins énergétiques plus faibles que les bâtiments standards. Ce premier niveau de performance peut être atteint par l'optimisation de l'isolation, la réduction des ponts thermiques et l'accroissement des apports passifs. Ce concept ne comprend a priori aucun moyen de production local d'énergie, sans toutefois l'exclure [Filippin 2006].

2- Le bâtiment « passif » (en allemand : Passivhaus, en anglais : passive house)

Ce bâtiment très faiblement consommateur d'énergie ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs : les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En pratique, un petit système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids ; il est le plus souvent associé à la ventilation [Garde 2001].

3- Le bâtiment « producteur d'énergie » (en anglais : *near zero energy house*)

Il est doté de moyens de production d'énergie locaux. Cependant, cette dénomination ne spécifie ni le niveau de consommation ni la part de cette consommation couverte par la production ni même la nature de l'énergie produite. Il s'agit donc plus d'une caractéristique du bâtiment que d'un concept de bâtiment à proprement parler. L'expression "*bâtiment producteur d'énergie*" est néanmoins parfois employée pour désigner un « bâtiment à énergie positive ».

4- Le bâtiment « zéro énergie » ou « zéro net » (en anglais : *net zero energy house*)

Ce bâtiment combine de faibles besoins d'énergie à des moyens de production d'énergie locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique net annuel est donc nul [Bernier 2006] [Garde 2007].

5- Le bâtiment « à énergie positive » (en allemand : *Plusenergiehaus*)

Ce bâtiment *producteur d'énergie* dépasse le niveau « zéro énergie » : il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Comme le précédent, ce bâtiment est raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa production électrique [Disch, 2008 ; Maugard *et al.* 2005].

6- Le bâtiment autonome

Un bâtiment est autonome lorsque sa fourniture énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. Ainsi la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux d'approvisionnement (foisonnement, sécurité d'approvisionnement), ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs, inertie thermique etc.). Ce type de bâtiment est particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordement aux divers réseaux.

b- Concepts plus larges

Certains concepts découlent d'approches globales qui prennent en compte un grand nombre d'interactions du bâtiment avec son environnement, la question énergétique ne formant qu'une partie de ces interactions. C'est le cas des méthodes *CASBEE* (Japon) [CASBEE 2008], *LEED* (États-Unis d'Amérique) [USGBC 2008] et *BREEAM* (Royaume-Uni) [BREEAM 2008] qui visent une labélisation ou une certification, mais aussi de la *norme R-2000* au Canada, qui est associée à une réglementation [R2000 2005]. En France, la *démarche HQE*® (Haute Qualité Environnementale), proposée aux maîtres d'ouvrage, ne fixe aucun objectif de performances [AssoHQE 2006]. Des organismes certificateurs proposent des référentiels.

Ces différentes approches globales visent à apprécier la « qualité environnementale » du bâtiment. Cependant, les critères de performances environnementales considérés sont nombreux et variables selon les approches, parfois subjectifs, et donc sujets à débats et controverses³. D'autres concepts sont basés sur une approche économique. Les principaux concepts identifiés sont les suivants :

1- « zero utility cost house », « net zero annual energy bill » ou « zero energy affordable housing »

Ces expressions, plutôt évoquées au Japon ou aux États-Unis d'Amérique, désignent des bâtiments dont la facture énergétique est nulle : la vente d'une partie de la production énergétique du bâtiment compense les frais engendrés par l'achat de l'énergie consommée (électricité, hydrocarbures etc.). Cette approche est privilégiée dans l'habitat social pour lequel la facture énergétique représente une part importante du budget des occupants. L'objectif est atteint grâce à la réduction des consommations et à l'usage de ressources énergétiques renouvelables gratuites. Mais le bilan dépend de facteurs non physiques tels que les prix des énergies ou les offres commerciales des fournisseurs.

2- « maison neutre en carbone », « maison zéro carbone » ou « bâtiment à émission zéro » (en anglais : *carbon neutral house* ou *low carbon house*)

Ces expressions désignent un bâtiment dont le fonctionnement n'induit aucune émission de CO₂. Cette orientation, qui s'inscrit dans la démarche du protocole de Kyoto, vise à réduire la participation du bâtiment à l'accroissement de l'effet de serre. La démarche "zéro carbone" est généralement associée à un mode de vie, dont la portée, au-delà du bâtiment, englobe les modes de déplacement, voire les modes de consommation des occupants du bâtiment. L'une des conséquences de cette démarche est l'utilisation exclusive de ressources énergétiques renouvelables. Le projet *BedZed*, en Angleterre, a été réalisé selon ce principe [BedZed 2008].

3- Le bâtiment « vert », « durable », « soutenable » ou « écologique » (en anglais : *green building*)

Ces qualificatifs font référence à des notions surtout symboliques dont les concepts associés sont mal définis⁴. Ils dépassent très largement le cadre énergétique et soulignent plutôt le faible impact **environnemental** du bâtiment, par exemple par les matériaux mis en oeuvre. L'une des multiples facettes de tels bâtiments peut éventuellement correspondre à l'un des concepts présentés plus haut.

4- Le bâtiment « intelligent » (en anglais : *intelligent building*)

Cette expression désigne un bâtiment qui présente une forme « d'intelligence », généralement apportée par des automates programmables et des systèmes informatiques de supervision. Ces équipements visent à améliorer la gestion de certaines fonctions modulables du bâtiment, telles que la protection solaire, la ventilation, le chauffage, l'éclairage ou la sécurisation des accès. Il existe une multitude de définitions de ce concept [Wong *et al.* 2005], cependant l'objectif essentiel du bâtiment intelligent semble être **l'amélioration du confort et de la productivité des occupants** à l'intérieur du bâtiment. Par conséquent les préoccupations énergétiques et environnementales peuvent y être secondaires, voire absentes.

V- LES CRITERES D'EVALUATION PROPRES AUX BATIMENTS PERFORMANTS

Il apparaît une forte convergence des concepts décrits aux paragraphes précédents autour de quelques caractéristiques principales telles que :

- **le besoin énergétique annuel de chauffage**, rapporté à une surface, généralement la surface chauffée
- **la consommation d'énergie**, également par unité de surface, pouvant inclure le chauffage, mais aussi l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, la ventilation, les auxiliaires, voire les autres usages de l'électricité, cet indicateur étant le plus souvent exprimé en énergie primaire
- **la production** d'énergie à partir de ressources renouvelables

Les concepts diffèrent surtout par les niveaux d'exigence de chacun d'eux vis-à-vis de ces caractéristiques. Ces niveaux d'exigence constituent des critères permettant de vérifier si les objectifs du concept sont atteints.

Quelques caractéristiques secondaires peuvent s'ajouter aux précédentes, telles que

- **l'étanchéité** du bâtiment à l'air
- les **performances** des équipements et des matériaux mis en oeuvre
- **des éléments non énergétiques**, tels que la nature des matériaux (naturelle ou synthétique), le surcoût de la construction, les émissions de CO₂, le niveau de confort thermique etc.

Synthèse

Tous les concepts présentés dans cette partie convergent autour de quelques critères simples visant à l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment, à la valorisation des ressources énergétiques locales ou à l'intégration de préoccupations environnementales ou économiques. Seuls l'approche retenue, le niveau d'exigence et les spécificités géographiques locales expliquent la variété des critères considérés.

Définir l'ensemble des bâtiments « à basse consommation *et* producteurs d'énergie » qui intègre notamment les bâtiments à basse consommation, les bâtiments passifs et les bâtiments à énergie positive — ne pose aucun a priori sur la valeur des bilans d'énergie ni sur les choix technologiques envisageables. Dans cet ensemble, le « **bâtiment à énergie positive** » représente le niveau de performance le plus élevé. Le bilan énergétique positif doit être considéré avant tout comme un objectif de conception, dont seules des mesures sur un bâtiment réel permettront d'attester la validité. En particulier, le standard Passivhaus, en raison de son large développement et du retour d'expérience qui en découle, pourra constituer une base de travail pertinente pour l'étude de bâtiments à énergie positive.

1- Définition du bâtiment à énergie positive

Il n'a pas été possible de tirer de la littérature une définition claire, rigoureuse et unique de ce concept. La plupart des définitions rencontrées se rapportent au bâtiment zéro énergie et demeurent très variées et assez peu précises [Voss et Kramp 2007]. Par exemple, aux États-Unis d'Amérique, le **Zero Energy Home (ZEH)**, proposé par le ministère de l'énergie (U.S. Department of Energy, DoE) dans le cadre du programme de recherche *Building America*, est défini comme un bâtiment produisant *autant ou plus d'énergie qu'il n'en a besoin*. Même si un tel bâtiment peut être connecté à un réseau d'énergie, il présente un bilan net de consommation d'énergie nul vis-à-vis du fournisseur d'énergie.

Sans que cela soit totalement explicité dans sa définition⁵, il semble que le ZEH considère essentiellement les consommations d'électricité.

Au Canada, la *NetZero Energy Home Coalition* propose une définition assez proche, ne considérant précisément que le bilan électrique, ce qui a l'avantage de la clarté :

Une Net-Zero Energy Home (NZEH) fournit annuellement au réseau une quantité d'électricité au moins égale à la quantité d'électricité soutirée au réseau. Dans de nombreux cas, la totalité de la consommation énergétique (chauffage, rafraîchissement et électricité) d'une NZEH peut être fournie par des sources d'énergies renouvelables. »⁷

En Europe, les concepts de « **maison basse énergie** » et de « **maison passive** » sont décrits respectivement par la réglementation allemande EnEV et par le standard Passivhaus. Par contre, le concept de « **maison à énergie positive** », évoqué par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en France [Maugard *et al.* 2005] et par quelques architectes tels que Rolf Disch en Allemagne [Disch 2008], n'est jamais précisément défini. C'est la raison pour laquelle **la définition suivante est proposée :**

« *Sur une année donnée de sa phase d'exploitation, un bâtiment assurant un usage résidentiel ou tertiaire pour lequel il est conçu est à « énergie positive » si et seulement si l'énergie totale exportée est supérieure à l'énergie totale importée par le bâtiment. Le bilan intègre aussi les parties annexes du bâtiment lorsqu'elles participent aux fonctions pour lesquelles il est conçu (local technique, cave, garage, etc.)* »

Cette définition s'appuie donc sur :

- Une approche d'équilibre énergétique local [Voss et Kramp 2007]
- Les contenus énergétiques de l'ensemble des flux *réellement* échangés : Les notions d'importation et d'exportation font référence aux échanges d'énergie entre le bâtiment et les différents réseaux de distribution d'énergie (chaleur, combustibles, électricité) auxquels il est connecté. Ces échanges sont quantifiables. Par contre, l'énergie échangée avec l'environnement immédiat du bâtiment (air, eau, sol) n'est pas comptabilisée.
- Une période temporelle d'observation annuelle, afin d'abstraire le bilan des biais saisonniers.

L'énergie considérée ici correspond au contenu énergétique des flux réels, qui sera désignée par la suite *énergie finale*. Ce contenu est facilement mesurable en ce qui concerne la chaleur ou l'électricité. Par contre, une convention est nécessaire pour la comptabilisation du contenu énergétique des combustibles. Le *pouvoir calorifique supérieur* (PCS), correspondant à l'enthalpie libérée par la réaction de combustion, est préférable au *pouvoir calorifique inférieur* (PCI) du fait qu'il est tout à fait possible de valoriser par condensation la chaleur latente de vaporisation de l'eau produite. Dans les deux cas, cette convention doit être explicitement précisée.

2- Discussion sur la définition proposée

Le choix de l'énergie finale pour la réalisation du bilan, facilite la comptabilité énergétique, par contre, ce raisonnement fait abstraction de la nature des flux considérés et de la chaîne énergétique amont associée. En effet, la prise en compte de la nature des flux mènerait à une comptabilité *exergétique*, tandis que la prise en compte de la chaîne énergétique mènerait à une comptabilité *en énergie primaire* découlant d'une analyse de la chaîne de transformation et de transport des différents vecteurs énergétiques. Compte tenu des diverses définitions actuellement retenues pour les bâtiments à énergie zéro ou à énergie positive, ces deux types d'analyses n'ont pas été retenus. Pourtant les analyses en exergie et en énergie primaire fourniraient une information plus en adéquation avec les interactions du bâtiment avec son environnement.

VI- EXEMPLE DE REALISATION DE BATIMENT PERFORMANT.

Dans cette partie nous présentons quelques exemples de bâtiment performants construits en Europe.

1- Immeuble d'habitation de Klosterenga (oslo, Norvège) : L'immeuble d'habitation à basse consommation de Klosterenga dont une vue est donnée à la Figure 8 a été construit dans le quartier le plus ancien d'Oslo. Un effort important a été fait pour la conception architecturale et l'accent a été mis sur des techniques solaires innovantes. Les éléments énergétiques majeurs de ce projet sont [Sunh&Shine 2001] :

- Consommation de chauffage égale à 40 kWh/m²an ;
- Façade sud équipée d'une double peau vitrée et d'un préchauffage passif de l'air de ventilation. Un store vénitien placé au milieu de la double peau vitrée assure l'ombrage et un meilleur contrôle du confort intérieur ;
- Pièces nécessitant une température supérieure stable placées au centre (cuisine et salle de bains) et pièces à des températures inférieures orientées au nord. Les pièces supportant des variations de température acceptables sont orientées au Sud (séjour) ;

- Système solaire actif qui consiste en 240 m² de capteurs à eau installés sur le toit. Ce système solaire produit 75 MWh/an. La consommation totale d'énergie pour le chauffage est de 195 MWh/an et de 105 MWh/an pour l'ECS ;
- Fenêtres hautes et étroites afin de favoriser la pénétration de la lumière naturelle dans le bâtiment.



Figure 8 : Vue des logements de Klosterenga (Oslo, Norvège) [Sunh&Shine 2001]

2- Rénovation de Logements sociaux à Mehrfamilienhäuser (Freiburg, Allemagne) : le bâtiment 'Mehrfamilienhäuser' (Figure 9), est composé de 42 logements sociaux groupés en deux bâtiments construits en 1961. En 2005, les deux bâtiments ont été rénovés de deux manières différentes afin de montrer l'intérêt des deux solutions (Tableau 3). La grande différence entre les consommations avant et après la rénovation montre l'intérêt de cet acte.



Figure 9 : Vue de la façade nord du bâtiment Mehrfamilienhäuser (Freiburg, Allemagne)

	Avant	Rénové 1	Rénové 2
Isolation	-	20 cm ($\lambda=0.038$ W/m K)	20 cm ($\lambda=0.040$ W/m K)
Vitrage	Simple	Triple ($U=0,8$ W/m ² K)	Double ($U=1,3$ W/m ² K)
Infiltration (sous 50 Pa)	2,8 vol/h	1,2 vol/h	1,2 vol/h
Ventilation	Naturelle	VMC double flux ($\eta_{vmc}=80\%$)	VMC simple flux
Capteur solaire (pour l'ECS)		25 m ²	25 m ²
Coût de rénovation		1050 €/m ² TTC	900 €/m ² TTC
Consommation (chauffage +ECS)	342 kWh/m ² an	53,8 kWh/m ² an	62,5 kWh/m ² an

Tableau 3 : Eléments de la rénovation du bâtiment Mehrfamilienhäuser

3- Bâtiment passif Wohnen & Arbeiten : le bâtiment Wohnen & Arbeiten (Figure 10) a été construit en 1999 à Freiburg en Allemagne. Le Tableau 4 donne quelques caractéristiques de ce bâtiment [solaires-bauen].



Figure 10 : Vue du bâtiment Wohnen & Arbeiten (Freiburg, Allemagne) [solaires-bauen]

Micro-cogénération	10 kW thermique et 5 kW électrique
Vitrage	U= 1,0 W/m ² K, facteur solaire 0,60
Surface utile	1520 m ²
Besoins de chauffage	13,2 kWh/m ² an
Label	Passivhaus

Tableau 4 : Caractéristiques du bâtiment Wohnen & Arbeiten

4- Bâtiment passif ISIS (Freiburg, Allemagne) : le bâtiment ISIS (Figure 11) a été construit en 2001 à Freiburg en Allemagne, avec un coût supplémentaire de 9% par rapport aux bâtiments traditionnels. Le Tableau 5 donne quelques caractéristiques de ce bâtiment [solares-bauen].



Figure 11: Vue du bâtiment ISIS (Freiburg, Allemagne) [solares-bauen]

Murs extérieurs	U=0,13 W/m ² K
Toiture	U=0,11 W/m ² K
Parois vitrées	U= 0,90 W/m ² K
Chauffage + ventilation	Systeme compact par appartement, avec récupération de chaleur
Surface utile chauffée	1370 m ²
Besoins de chauffage	12,6 kWh/m ² an
Label	Passivhaus

Tableau 5 : Caractéristiques du bâtiment ISIS

5- *Cité solaire du Schlierberg (Freiburg, Allemagne)* : la cité solaire du Schlierberg (Figure 12) à Freiburg est constituée de logements collectifs à énergie positive. De larges baies vitrées au sud constituent la principale source de chaleur et assurent l'éclairage naturel des pièces principales. La toiture et les protections solaires sont couvertes de capteurs photovoltaïques. Les balcons sont en acier galvanisé et partiellement solidaires de la structure pour limiter les ponts thermiques. Le Tableau 6 donne quelques caractéristiques du bâtiment [Schlierberg 2007].



Figure 12 : Vue de la cité solaire du Schlierberg (Freiburg ,Allemagne) [Schlierberg 2007]

Murs extérieurs	U=0,12 W/m ² K
Toiture	U=0,12 W/m ² K
Parois vitrées	U=0,7 W/m ² K
Ventilation	VMC double flux
Production des capteurs PV	3 à 12 kW (selon la taille du bâtiment)
Besoins de chauffage	10 à 15 kWh/m ² an

Tableau 6 : Caractéristiques de la cité solaire du Schlierberg

6- Maison à énergie positive de Fellbach (Fellbach, Allemagne) : pour cette maison à ossature bois (Figure 13), un effort particulier a été fait pour l'enveloppe. Les besoins de chauffage, de l'ordre de 11 kWh/m²an, sont assurés par une PAC dont les consommations électriques sont fournies par des capteurs photovoltaïques. Le Tableau 7 présente les principales caractéristiques de la maison [solarserver].



Figure13 : Vue de la maison de Fellbach (Allemagne) [solarserver]

Parois opaques extérieures	U=0,1 W/m ² K
Parois vitrées	U = 0,7 W/m ² K
Infiltration (sous 50 Pa)	0,5 vol/h
Ventilation	VMC double flux
Puits canadien	L=30 m
Capteurs PV	8 kWc (7500 kWh/an)
Besoins de chauffage	11 kWh/m ² an (assuré par une PAC)

Tableau 7 : Caractéristiques de la maison de Fellbach

Ces deux derniers bâtiments montrent que même avec une grande proportion de surfaces vitrées caractérisées par un coefficient U plus élevé que celui des parois opaques, les besoins de chauffage peuvent être très faibles grâce aux gains. Le vitrage est, en fait, le premier élément passif de l'enveloppe des bâtiments.

CONCLUSION

Ce chapitre a été essentiellement axé sur la problématique des consommations énergétiques et des émissions des gaz à effet de serre dues au secteur du bâtiment et ceci a permis de mettre en évidence plusieurs points.

Tout d'abord, l'analyse des différents postes énergétiques tant au niveau de la conception de l'enveloppe des bâtiments que des équipements techniques a mis en évidence les axes sur lesquels doivent porter les efforts en matière de consommations énergétiques. Ainsi, il est apparu que des solutions existent même pour les bâtiments à énergie positive, mais qu'elles requièrent l'attention de tous les acteurs de l'acte de construire afin d'être efficacement mises en œuvre. Certaines solutions évoquées dans cette étude sont intégrées aussi bien dans des réglementations que dans des labels.

La présentation de nombreux bâtiments à haute efficacité énergétique labellisés ou non prouve que pour la construction neuve ou la rénovation de bâtiments anciens, il est possible d'atteindre d'excellents niveaux d'exigence de performance avec un surcoût inférieur à 10%.

Vue la diversité et la disponibilité des solutions, il apparaît clairement que des efforts importants sont à faire sur l'estimation énergétiques des rayonnements thermo- solaires et sur le mode de conception du bâtiment, notamment l'analyse de l'impact des solutions techniques sur les performances du bâtiment tel que les besoins énergétiques du bâtiment, avant de choisir les plus adéquates.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

CHAPITRE II

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} 1+2\frac{\Delta t}{\tau_1} & -2\frac{\Delta t}{\tau_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\Delta t}{\tau_1} & \left(1+2\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) & -\frac{\Delta t}{\tau_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\Delta t}{\tau_1} & \left(1+2\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) & -\frac{\Delta t}{\tau_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_1}{k_1+k_2} & 0 & \frac{k_2}{k_1+k_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{\tau_2} & \left(1+2\frac{\Delta t}{\tau_2}\right) & -\frac{\Delta t}{\tau_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\frac{\Delta t}{\tau_2} & 1+2\frac{\Delta t}{\tau_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}^{t+1} + \begin{bmatrix} -2\frac{\Delta t}{C_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -2\frac{\Delta t}{C_2} \end{bmatrix}$$

MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Dans ce chapitre nous allons aborder les domaines du thermique, l'aérodynamique et l'hydraulique du bâtiment en présentant les différentes relations mathématiques associées à la modélisation des phénomènes physiques intervenant dans l'estimation thermo-énergétique des bâtiments. Après une introduction à la modélisation énergétique des bâtiments et en particulier l'évolution des approches, nous présentons le formalisme des phénomènes. Nous exposons la mise en équation associée, en soulignant pour la partie thermique les particularités d'une description multizone du bâtiment. Enfin, nous abordons l'aspect implémentation des équations en donnant des indications sur les stratégies de couplage des modèles.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

I- INTRODUCTION

Une sensibilisation sur l'épuisement des ressources énergétique se développe dans notre société. Le développement économique, avec une utilisation intensive et souvent mal gérée des énergies, met en péril notre écosystème. La conférence de kyoto par exemple, a tiré la sonnette d'alarme sur les gaz à effet de serre et un protocole a été signé pour la réduction de GES. L'implication sur l'utilisation rationnelle de l'énergie est directe. Elle ne fait que renforcer la démarche de maîtrise énergétique entamée suite aux crises pétrolières mais cette fois-ci avec une forte composante environnementale.

La diminution de la consommation d'énergie primaire est toujours d'actualité. On se retourne donc vers les consommateurs d'énergie. Un des gros consommateurs, identifié depuis les années 70 dans les pays de l'OCDE (Organisation pour coopération et le développement économique), est le secteur du bâtiment. Ce constat a engendré un développement considérable de la recherche en énergétique afin de tendre vers une conception optimale du bâtiment. Les axes de recherche s'étendent de l'enveloppe (isolation, matériaux, vitrages,...) jusqu'aux différents types d'installations technique en incluent des systèmes de régulation et de gestion technique. Pour mieux comprendre et prédire les phénomènes intervenant dans le bâtiment, la communauté scientifique fait appel aux techniques de modélisation et de simulation numérique. Il en découle que les outils de simulation sont devenus quasiment incontournables pour toute étude en énergétique du bâtiment liée aux exigences de confort et santé ainsi qu'aux questions économiques et aux impacts environnementaux.

En conséquence, la démarche des concepteurs, dont les méthodes antérieures étaient basées sur des bilans énergétiques simples, réalisés pour des conditions de régime permanent, a dû faire face à ces nouvelles contraintes, en s'appuyant en particulier sur des outils plus performants, tels les codes de simulation du comportement énergétique des bâtiments.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Impulsée par la nécessité de trouver l'optimum confort thermique/dépenses énergétiques, la méthodologie actuelle fait intervenir la combinaison de l'outil informatique et de l'expérience [Garde, 2001] [Moudjaled 2007].

Ces préoccupations ne sont pas sans conséquences sur les développements des codes de simulation ; on assiste en effet à une évolution des codes suivant l'orientation d'une approche globale et intégrée [Citherlet, 2001] [Ellis, 1999] ; ainsi, en plus des phénomènes énergétiques, des considérations liées aux différents phénomènes physiques intervenant au sein du bâtiment mènent à des critères globaux de qualité des enveloppes et des ambiances ; on parle ainsi des différents aspects du confort, comme par exemple le confort acoustique ou visuel, mais également de la qualité des ambiances, en particulier celle de l'air. Ces diverses considérations entrent dans le cadre d'un développement durable, et incluent de ce fait l'ensemble des étapes de la vie d'un bâtiment, de sa construction à son éventuelle destruction.

Les développements de l'informatique, en particulier la puissance de calcul des ordinateurs, ouvrent la voie vers l'utilisation courante d'outils encore plus détaillés, tels les codes CFD (Computational Fluid Dynamics). Les perspectives étant nombreuses et riches, on assiste actuellement à une démarche allant dans ce sens, le couplage multizone /CFD. Ainsi, les outils déjà complets de simulation du comportement énergétique des bâtiments peuvent être munis d'un module CFD afin de permettre par exemple les prévisions de la diffusion des polluants dans l'air ou encore la prédiction fine des conditions de confort thermique en fonction de conditions de ventilation données [Beausoleil- Morrison, 2000].

II- MODELISATION:

Pour modéliser le comportement énergétique des bâtiments il nous faut écrire l'ensemble des relations traduisant les phénomènes physiques, pour des échelles de discrétisation spatiale et temporelle données. Elle combine donc une description du bâtiment selon le premier axe des phénomènes physiques (thermiques, aérauliques,

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

hydriques, acoustiques, etc.) et une description selon le second axe des paramètres structurels. Ces deux visions sont naturellement couplées dans la mesure où les données structurelles matérialisent les supports physiques des phénomènes (parois et vitrages pour les phénomènes thermiques et acoustiques, bouches de ventilation et ouvertures pour les phénomènes aérauliques, etc.).

L'échelle de discrétisation conditionne de plus les différents niveaux de complexité des modélisations effectuées et définit le maillage du bâtiment. Une maille constituera donc une entité élémentaire dont les propriétés thermo- physiques seront supposées homogènes.

Les considérations précédentes conduisent à définir différents types de modélisation du système bâtiment, parmi lesquels [Woloszyn, 1999] [Tardau 97] [Beggas 2007] [Chwieduk 2008] :

- **Modèle de code de champ**

Les codes de champs découpent le volume étudié en un grand nombre de mailles (plusieurs dizaines ou centaines de milliers en général) donc une discrétisation très fine de la géométrie du bâtiment construite géométriquement [FLU 98 et EST 97], qui permettent de suivre en détail l'évolution des mouvements d'air et des températures à l'intérieur d'un volume. Ils sont typiquement utilisés pour étudier le comportement d'une pièce. En effet, la capacité des calculateurs nécessaire ainsi que des longs temps de calcul limitent les applications de ces outils à des objets d'un volume relativement faible. Les codes de champs nécessitent également un opérateur très qualifié car leur bon usage exige une parfaite compréhension des phénomènes physiques ainsi qu'une bonne connaissance de l'outil. De plus, ils demandent une description très détaillée du problème étudié (position exacte des ouvertures, des bouches de ventilation, etc.). Malgré l'utilisation d'une discrétisation basée sur la géométrie, ils sont très sensibles à la modélisation des objets courants (bouches de ventilation, convecteurs électriques,...).

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

- **Les modèles monozones,**

A l'autre extrémité, nous avons une famille de modèles monozones, très simples. Ces derniers considèrent que l'intérieur entier d'un bâtiment possède des caractéristiques uniformes (une maille) [BRA 83]. Ces modèles sont simples à utiliser et nécessitent uniquement des données générales concernant l'enveloppe du bâtiment et le système de ventilation. Ces modèles, très avantageux au niveau du temps calcul, ne sont toutefois pas adaptés aux évaluations du confort thermique, car trop peu précis en termes de qualification des ambiances

- **Les modèles multi- zones,**

Outre ces deux types de modélisation, extrême en quelque sorte, nous avons de nombreuses possibilités de discrétisation intermédiaires. Une approche classique consiste à bâtir des modèles multizones, c'est-à-dire où une zones thermique correspond à une pièce [Rol.85 – KOL 91 **Lauret 2006**].

Cette modélisation permet de prendre en compte la répartition non uniforme des températures dans les différentes pièces du bâtiment.

Elle permet également de conjuguer la modélisation thermique avec les mouvements de l'air. La modélisation multizones constitue un bon compromis entre les modèles monozones et les codes de champs, aussi bien au niveau des temps de calcul que la précision des résultats. Elle est particulièrement adaptée pour simuler des maisons complètes, voir même des bâtiments entiers. Elle est basée sur l'hypothèse des caractéristiques uniformes de l'air à l'intérieur de chaque pièce.

- **Les modèles zonaux**

Une forte stratification thermique peut être représentée avec succès par des modèles zonaux [INA, 96 WUR, 99], ils se situent entre les modèles multizones et les codes de champs, car chaque pièce est découpée en plusieurs zones. Ces dernières dépendent des écoulements dans chaque pièce (présence des jets de ventilation, des

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

panaches thermiques, ...). Les modèles zonaux permettent de représenter correctement les pièces avec une forte stratification thermique. En revanche, il nécessite une bonne connaissance de la configuration représentée et en particulier des écoulements moteurs. Une difficulté de cette modélisation résulte de la nécessité de construire le maillage (les zones) en fonction des propriétés de l'écoulement. Les modèles zonaux sont adaptés à l'étude d'un locale, même de taille importante, ou bien d'un ensemble comportant un nombre faible de pièce. Mais, dans le cas des configurations géométriques complexes, ou de changement de comportement thermiques ou aérauliques, ils montrent certaines limites.

- **Le choix du type de modélisation**

Le choix d'un type de modélisation est conditionné par la finalité du modèle [Boyer, 1993] [Chwieduk 2008] ; en effet, les différents niveaux de complexité ci-dessus induisent des répercussions sur les conditions de simulation, que ce soit au niveau des hypothèses de modélisation et du temps calcul, mais également sur les résultats de simulations en termes de quantité d'information et de possibilité d'exploitation.

Les modèles très détaillés par exemple, issus des codes de champs sont généralement destinés à des analyses fines sur des systèmes d'études simples, dont les conditions aux limites sont connues avec précision. Les modèles plus simplifiés, tels ceux multizones, sont plus adaptés à des systèmes d'étude complexes, dont les conditions aux limites sont le plus souvent variables.

L'évolution des consommations énergétiques annuelles des bâtiments est généralement étudiée sur la base de ce type de modélisation, à l'aide de codes de simulation du comportement énergétique des bâtiments. Ces derniers sont relativement nombreux et diffèrent par des particularités liées aux stratégies de couplage et aux méthodes de résolution des systèmes d'équations traduisant les phénomènes physiques. Citons à titre d'exemple les codes TRNSYS (Transient System Simulation Program), ESP (Environmental systems performance), CLIM2000, COMIS et CODYRUN [Boyer, 1993].

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Compte tenu de nos préoccupations, liées en particulier aux estimations thermo-solaire des énergies et au comportement physique de parois complexes, notre choix s'est porté sur une modélisation multizone, qui nous paraît constituer un bon compromis entre les codes de champ, très détaillés, et les codes monozones, très simplifiés.

Elle est basée, pour la partie thermique, sur les équations de bilan énergétique des parois du bâtiment et sur celles du bilan thermoconvectif du volume d'air des zones qui le composent. L'écriture de ces bilans pour l'ensemble des zones mène à un système d'équations, qui une fois résolue, fournit les températures et les flux au travers de ses éléments constitutifs.

Afin de mettre en évidence les types de relations que peut induire une telle approche, nous nous proposons dans la suite de détailler les relations mathématiques traduisant les différents phénomènes physiques intervenant dans la modélisation du bâtiment et de son environnement, en particulier celles que nous avons intégrées à notre environnement de modélisation.

III- RELATION INTERVENANT DANS LA MODELISATION THERMIQUE DE LA MAISON

Ces relations traduisent les phénomènes physiques qui conditionnent le comportement énergétique de la maison thermo- solaire et concernent aussi bien la prise en compte de l'environnement extérieur que des conditions d'ambiance internes. Nous nous intéressons dans un premier temps aux sollicitations climatiques et nous présentons ensuite le formalisme des phénomènes thermiques au sein du bâtiment.

1- LES SOLLICITATIONS CLIMATIQUES (Radiatives)

Les sollicitations radiatives sont imposées par l'environnement extérieur de la maison sur une grande plage de longueurs d'ondes. Il est usuel, dans le cas de la

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

modélisation énergétique de la maison, de classer ces sollicitations radiatives en deux catégories [Perez-Sanchez, 1989] [Cyril 2006]:

- Les sollicitations de grandes longueurs d'ondes (GLO)
- Les sollicitations de courtes longueurs d'ondes (CLO)

Ceci est dû aux propriétés thermo- physiques des matériaux du bâtiment, qui prennent des valeurs bien distinctes en fonction de la gamme de longueur d'onde considérée et en conséquence au comportement radiatif différent des matériaux suivant cette classification. Les vitrages par exemple, sont presque totalement opaques au rayonnement de grande longueur d'onde alors qu'ils transmettent de manière importante le rayonnement de courte longueur d'onde.

A- LES SOLLICITATIONS DE COURTES LONGUEURS D'ONDES (CLO)

Problématique

La modélisation doit prendre en compte :

Les données horizontales des rayonnements direct et diffus provenant du soleil.

Les unités de grandeur mis en jeu

La course du soleil qui signifie que le flux solaire incident sur les parois est variable.

B- LES SOLLICITATION DE GRANDE LONGUEURS D'ONDE

Les éléments de l'environnement de la maison c'est-à-dire les bâtiments qui l'entourent et la voûte céleste, en plus de leurs températures, émettent un rayonnement GLO ; ce qui les lie aux sollicitations de grande longueurs d'onde.

Le modèle mathématique de ces sollicitations fait intervenir une température de l'environnement T_e , et une température caractéristique de l'état thermique de la voûte céleste, la température du ciel T_{ciel} .

On a alors :

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

$$F_{ge,p} = A \left[\left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \cdot (T_{ciel}^4 - T_{e,p}^4) + \left(\frac{1 - \cos \alpha}{2} \right) \cdot (T_e^4 - T_{e,p}^4) \right]$$

où

$$A = S_p \sigma \varepsilon_p$$

avec :

$F_{ge,p}$: flux grand longueur d'onde extérieur incident sur une paroi p [W]

S_p : surface de la paroi p [m²]

ε_p : émissivité de la paroi p

σ : constante de Stefan-Boltzmann [W./m² .K⁴]

α : inclinaison de la paroi p [rad]

$T_{e,p}$: température de la surface de la paroi p

T_{ciel} : température équivalente de ciel

T_e : température équivalente de l'environnement

Les facteurs de formes f_{pc} (entre la paroi et la voûte céleste) f_{ps} (entre la paroi et le sol) sont représentés par les termes liés à l'inclinaison.

$$F_{ge,p} = A [f_{pc} \cdot (T_{e,p}^4 - T_{ciel}^4) + f_{ps} \cdot (T_{e,p}^4 - T_e^4)]$$

La température de l'environnement T_e est souvent assimilée à la température de l'air extérieur T_{ae} . De plus, cette expression est couramment linéarisée, pour prendre la forme suivante :

$$F_{ge,p} = S_p [h_{pc} f_{pc} \cdot (T_{e,p} - T_{ciel}) + h_{pe} f_{ps} \cdot (T_{e,p} - T_e)]$$

avec

$$h_{pc} = \sigma \varepsilon_p (T_{ciel}^2 + T_{e,p}^2) (T_{ciel} + T_{e,p}) \cong 4 \cdot \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{mc}^3$$

$$h_{pe} = \sigma \varepsilon_p (T_e^2 + T_{e,p}^2) (T_e + T_{e,p}) \cong 4 \cdot \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{me}^3$$

T_{mc} et T_{me} sont respectivement les températures moyennes de surface et de ciel d'une part et de surface et d'environnement d'autre part.

En posant :

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

$$H_{pc} = h_{pc} f_{pc}$$

$$H_{ps} = h_{ps} f_{ps}$$

Il vient alors :

$$F_{ge,p} = S_p [H_{pc} (T_{se,p} - T_c) + H_{pe} (T_{se,p} - T_e)]$$

h_{pc} et h_{ps} variant très peu dans la plage de température caractéristique des climats tempérés, [Cacavelli, 1988] propose de considérer :

$$h_{pc} = 4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\text{et } h_{ps} = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

2- LES SOLLICITATIONS RADIATIVES INTERIEURES

Différents modèles permettent de prendre en compte l'impact de ces sollicitations radiatives sur l'état thermique de la maison. Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde dans la maison sont liés aux énergies émises et réfléchies par les composants de l'enveloppe. Nous vous proposons deux méthodes pour expliquer ces sollicitations :

A- LA METHODE EXACTE (OU METHODE DES RADIOSITES)

Cette méthode, présentée pour la première fois par [Hottel, 1954] et développée ultérieurement par [Poljak, 1953] et [Gebhart, 1957], permet la modélisation des échanges radiatifs GLO dans une enceinte composée d'un nombre quelconque n de parois. Elle fait intervenir la notion de radiosité R d'une surface, grandeur représentant la quantité d'énergie (flux) quittant cette surface par rayonnement émis et réfléchi.

Les hypothèses retenues pour la modélisation des transferts radiatifs GLO par cette méthode sont les suivantes :

1. Les densités de flux et les températures de surface sont uniformes
2. Les surfaces sont grises, lambertiennes (réflexion diffuse) et opaques pour le rayonnement GLO

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

3. Le milieu contenu dans l'enceinte est parfaitement transparent

Si l'enceinte se compose de n parois, la radiosité de la paroi p vaut alors :

$$R_p = \varepsilon_p \cdot M_p^o + \rho_p \cdot \sum_{j=1}^n f_{pj} R_j = \varepsilon_p M_p^o + (1 - \varepsilon_p) \sum_{j=1}^n f_{pj} R_j$$

Avec

ε_p : émissivité GLO de la paroi p

M_p^o : émittance GLO de la paroi p [W/m²]

ρ_p : réflectivité de la paroi p

f_{pj} : facteur de forme entre les surfaces p et j

En écrivant cette expression pour chaque surface, on obtient un système d'équations en radiosités écrire les équations :

$$\sum_{j=1}^n [\delta_{pj} - (1 - \varepsilon_p) f_{pj}] R_j = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{i,p}^4$$

avec

δ_{pj} : symbole de kroniker

$T_{i,p}$: température de surface intérieure de la paroi

Les flux nets des parois (flux émis – flux absorbé) s'écrivent alors :

$$F_{gi,net,p} = S_p \left(\frac{\varepsilon_p}{1 - \varepsilon_p} \right) (\sigma \cdot T_{i,p}^4 - R_p) \text{ ou } F_{gi,net,p} = S_p \cdot \sum_{j=1}^n (\delta_{pj} - f_{pj}) R_j$$

On distingue deux cas

1- température de surfaces connus

Nous résoudrons le système de radiosité suivant :

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - (1 - \varepsilon_1)f_{11} & -(1 - \varepsilon_2)f_{12} & \cdot \cdot & -(1 - \varepsilon_n)f_{1n} \\ -(1 - \varepsilon_1)f_{21} & 1 - (1 - \varepsilon_2)f_{22} & \cdot \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -(1 - \varepsilon_1)f_{n1} & \cdot & \cdot & 1 - (1 - \varepsilon_n)f_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 M_1^0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n M_n^0 \end{bmatrix}$$

On calcule les flux nets par :

$$F_{gi,net,p} = \frac{\varepsilon_p}{1 - \varepsilon_p} \cdot (\sigma T_{i,p}^4 - R_p) \cdot S_p$$

2- Flux nets connus :

Le système en radiosité à résoudre est alors le suivant :

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - f_{11}) \cdot S_1 & -f_{12} S_2 & \cdot \cdot & -f_{1n} S_n \\ -f_{21} S_1 & (1 - f_{22}) \cdot S_2 & \cdot \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -f_{n1} \cdot S_1 & \cdot & \cdot & (1 - f_{nn}) S_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{gi,net,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ F_{gi,net,n} \end{bmatrix}$$

Les températures sont ensuite évaluées par :

$$T_{si,p}^4 = \frac{1}{\sigma} \cdot \left[\frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \cdot F_{gen,et,p} + R_p \right]$$

Ce formalisme permet d'évaluer la température radiante moyenne par l'expression :

$$T_{rm} = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^n R_i f_{ci}}{\sigma}}$$

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Les f_{ci} sont des facteurs de formes qui peuvent être évalués de manière simplifiée par Allard [Allard 1986]

$$f_{ci} = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^n S_j}$$

B- UNE METHODE SIMPLIFIEE

Les transferts radiatifs intérieurs peuvent également être approchés par les relations qui vont suivre et qui font intervenir la notion de température radiante moyenne ; Allard signale que cette formulation de la température radiante moyenne génère des erreurs de quelques dixièmes de degrés par rapport à celle issue de la méthode exacte [Allard, 1986].

La température radiante moyenne est obtenue au moyen de la moyenne pondérée par leurs surfaces respectives de chaque température de surface intérieure de la zone considérée

$$T_{rm} = \frac{\sum_{p=1}^n S_p \cdot T_{i,p}}{\sum_{p=1}^n S_p}$$

en posant

$$\sum_{p=1}^n S_p = S_{tot} \quad \text{il vient : } T_{rm} = \frac{\sum_{p=1}^n S_p \cdot T_{si,p}}{S_{tot}}$$

Le flux radiatif GLO intérieur pour chaque paroi est alors évalué de la manière suivante :

$$F_{gi,p} = h_{ri} \cdot S_p \cdot (T_{rm} - T_{i,p})$$

3- LES TRANSFERTS CONVECTIFS

Les transferts par convection interviennent tant à l'extérieur qu'à l'intérieur ; à l'extérieur, la convection est de type forcée sous l'influence du vent ; à l'intérieur, dans le cas le plus simple, elle est naturelle. Les relations traduisant ces phénomènes sont le plus

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

souvent des corrélations pour la convection extérieure, de type $h_{ce} = f(V)$, V étant la vitesse du vent; la convection intérieure fait l'objet de relations de types différents, allant du plus simplifié, h_{ci} constant, aux corrélations adimensionnelles, en passant par les relations du type :

$$h_{ci} = a.(\Delta T)^n + b.$$

1- CONVECTION FORCEE

Les échanges de chaleur par convection sont fonction de plusieurs paramètres :

- Ecart de température entre les surfaces et le fluide
- Vitesse et direction du vent
- Forme et rugosité de la maison ou du sol

La loi de Newton permet d'exprimer Le flux convectif en faisant intervenir un coefficient d'échange h_{ce} , sous :

$$F_{cve,p} = h_{ce} \cdot S_p \cdot (T_{e,p} - T_{ae})$$

avec

$F_{cve,p}$: Flux convectif extérieur de la paroi p [$W.m^{-2}$]

h_{ce} : Coefficient d'échange convectif extérieur [$W.m^{-2} .K$]

$T_{e,p}$: Température de surface extérieure de la paroi p [K]

T_{ae} : Température d'air extérieur

En convection forcée les effets aérauliques prédominent sur les effets thermiques donc le problème convectif se ramène à la détermination du coefficient d'échange h_{ce} , pour lequel de nombreuses corrélations existent, tenant compte le plus souvent de l'influence de la vitesse du vent et de la situation de la paroi (au vent ou sous le vent). Leur forme générale est la suivante :

$$h_{ce} = a + b \cdot V^n$$

Où les coefficients a , b , n sont constants.

Le tableau suivant nous montre quelques modèles de coefficient d'échange convectif :

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Auteur	Modèle
Sturrock	$h_{ce}=11.4+5.7V$
Ito	$h_{ce}= 11.7+0.3V$
Laret	$h_{ce}= 2+4V$
Croiset	$h_{ce}= 3.1+4.1V^{0.65}$
Tourrand	$h_{ce}= 16.5+2.57V^{1.02}$

Tableau 1 : Coefficient de convection en fonction du vent

Les principales différences existant entre les multiples modèles proposés découlent du cadre d'expérimentation, et du protocole expérimental (prise en compte du rayonnement, température de surface).

2- CONVECTION A L'INTERIEUR DU BATIMENT

A l'intérieur du bâtiment, la convection est le plus souvent naturelle, et les flux qu'elle génère se formalisent de la même manière que précédemment :

$$F_{cvi,p} = h_{ci} \cdot S_p \cdot (T_{i,p} - T_{ai})$$

avec :

$F_{cvi,p}$: flux convectif intérieur de la paroi p W.m

h_{ci} : coefficient d'échange convectif intérieur [$W.m^{-2} .K$]

$T_{i,p}$: température de surface intérieure de la paroi p [K]

T_{ai} : température d'air intérieure [K]

Le problème convectif se ramène la encore à la détermination d'un coefficient d'échange convectif, pour lequel plusieurs types de relations existent, de degré de finesse variable. Ces différentes approches sont consignées dans le Tableau.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Niveau de finesse croissant	Coefficient d'échange h_{ci} constant pour toutes les parois de la zone
+	<p>Coefficient d'échange h_{ci} défini selon le type de parois par exemple</p> <p>[Brau, 1992] :</p> $\begin{cases} \text{Plancher } h_{ci} = 1 W / m^2.C \\ \text{Plafond } h_{ci} = 6.1 W / m^2.C \\ \text{Parois verticales } h_{ci} = 4.09 W / m^2.C \end{cases}$
++	<p>Coefficient dépendant linéairement de l'écart de température paroi/air, $h_{ci} = a.((\Delta T)+b$</p>
+++	<p>Coefficient dépendant non linéairement de l'écart de température paroi/air, $h_{ci} = a.((\Delta T)^n + b$</p>
++++	<p>Coefficient h_{ci} donne par des corrélation adimensionnelles, du type $Nu = (Gr, Pr) = f (Ra)$</p>

Tableau 2 : Les différents niveaux de finesse de la modélisation des coefficients convectifs intérieurs

4- LES TRANSFERTS CONDUCTIFS

Les transferts conductifs sont les phénomènes régissant des températures des composants de l'enveloppe de la maison. Les autres modes de transfert de chaleur interviennent comme conditions aux limites et permettent ainsi d'assurer le couplage entre les différents modes de transfert (superficiels et internes).

Deux types de modèles existent : on distingue généralement les modèles dits de transfert et les modèles dits d'états [Berges, 1986] [HDR Ghiaus]. Les premiers utilisent le principe de superposition et le calcul opérationnel et les seconds sont issus de la discrétisation spatio-temporelle de l'équation de la chaleur.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

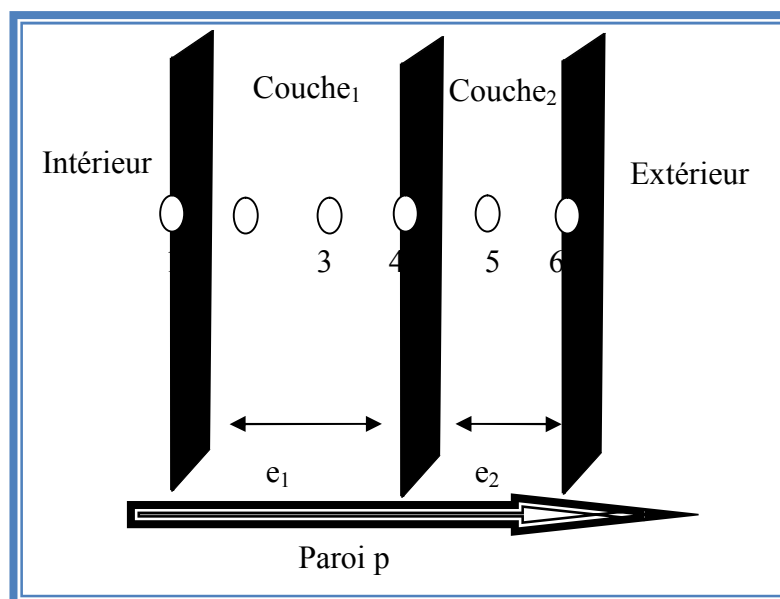
Le modèle d'analogie thermoélectrique est souvent utilisé pour modéliser les transferts conductifs dans les parois ; ce modèle est composé d'un ensemble de résistances et de capacités ; ces modèles sont alors dénommés par le nombre de capacités et de résistances qu'ils contiennent ; on parlera ainsi de modèle R2C ou de modèle 2RC, etc.

1- CONDUCTION DANS UNE PAROI

Considérons un modèle d'état basé sur la discrétisation spatio-temporelle de l'équation de la chaleur selon la méthode des différences finies. Cette approche offre l'avantage de garder toute la signification physique des termes intervenant dans la discrétisation spatio-temporelle de l'équation de la chaleur, vue sous l'angle de l'analogie thermo- électrique, se ramène, en fonction du nombre n de nœuds de discrétisation, à un modèle de type $(n - 1)R(n - 2)C$. Ainsi, en imposant un nombre bien déterminé de nœuds, le modèle conductif de paroi peut-être modifié, ce qui met en évidence l'aspect multi-modèle d'une telle approche.

De plus, en augmentant le nombre de nœud de discrétisation, il devient possible d'augmenter la précision du modèle quant à la prédiction du champ de température dans la paroi.

Afin d'illustrer la méthode, prenons par exemple le mur bicouche suivant :



CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Figure 1 : Conduction à travers un mur bicouche

Le problème conductif, en supposant le transfert monodimensionnel selon l'axe (Ox) compte tenu du grand rapport d'allongement des parois des bâtiments, se pose pour chaque couche de la manière suivante :

$$\frac{1}{d} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}$$

$$d = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}, \text{ diffusivité thermique de la couche}$$

Cette équation nécessite, compte tenu des dérivées partielles, du premier ordre en temps, du deuxième en espace, deux conditions aux limites spatiales et une condition aux limites temporelle.

Elles s'énoncent ainsi :

$$\text{Couche 1: } \begin{cases} Cl_1 : T(x,0) = T_1^0 \\ CL_1 : -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \Psi_1 \\ CL_2 : -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T(e_1,t)}{\partial x} = \Psi_2 \end{cases}$$

$$\text{Couche 2: } \begin{cases} Cl_1 : T(x,0) = T_2^0 \\ CL_1 : -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T(e_1, t)}{\partial x} = \Psi_2 \\ CL_2 : -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T(e_1 + e_2, t)}{\partial x} = \Psi_3 \end{cases}$$

Nous pouvons de plus distinguer les types de nœud suivants :

- Nœud de surface
- Nœud interne
- Nœud de liaison entre couches

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Les températures des noeuds de surface vont être régies par les relations décrivant les conditions aux limites sur les faces extérieures et intérieures de la paroi. Celles-ci sont conditionnées par les sollicitations des ambiances intérieures et de l'environnement extérieur.

La température du nœud de liaison est donnée par l'écriture de la conservation du flux de chaleur entre les deux couches selon le principe de conservation de l'énergie.

Les températures des nœuds internes sont issues de la discrétisation spatiotemporelle de l'équation de la chaleur, selon un schéma numérique, le plus souvent aux différences finies.

5- BILAN ENERGETIQUE DE SURFACE DES PAROIS

Le bilan énergétique au niveau des surfaces des parois, illustré sur la Figure 2, s'écrit de manière générale de la façon suivante :

$$\begin{cases} F_{ext} = F_{CVe} + F_{ce} + F_{ge} \\ F_{int} = F_{CVi} + F_{ci} + F_{gi} \end{cases}$$

Il fait intervenir les modes de transferts de chaleur par convection, au travers de la densité de flux F_{CVe} et par rayonnement (F_g et F_c) comme conditions aux limites du transfert conductif dans la paroi.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

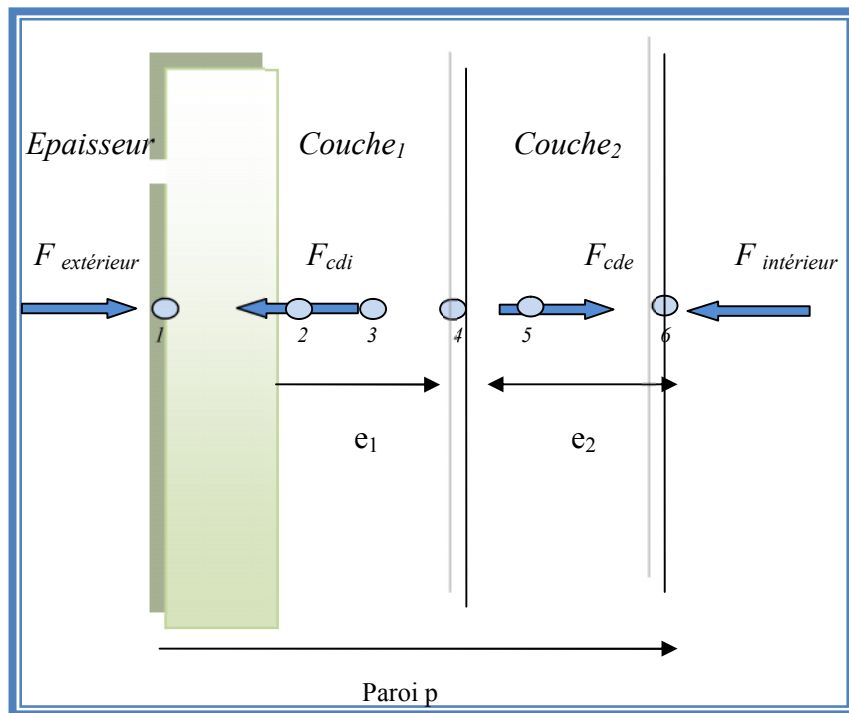


Figure 2 : Bilan énergétique de la surface

6- RESOLUTION DU PROBLEME THERMIQUE

1. Introduction

Sachant que l'entité élémentaire est la zone thermique, qui représente le volume d'air intérieur de la pièce, ou de l'ensemble de pièce considérés. Ce volume est caractérisé par un noeud de température d'air et un noeud de température radiante moyenne. Les frontières de la zone sont constituées des parois, qui interviennent selon la description nodale de la Figure 2.

En premier nous proposons l'illustration du dispositif d'assemblage et de résolution de l'ensemble des équations nécessaires au calcul des températures d'un bâtiment monozone simplifié ; ensuite l'approche à un cas multizone, en notant les implications d'une description plus fine du bâtiment.

2. Bilan thermo-convectif du noeud d'air

De manière générale, l'équation du bilan thermo-convectif de l'air est formalisée de la manière suivante:

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

$$\sum_{p=1}^n h_{ci} \cdot S_p \cdot (T_{i,p} - T_{aj}) + \sum_{k=1}^{Nz} Q_{kj} \cdot C_k \cdot T_{ak} - Q_{tj} \cdot C \cdot T_{aj} + G_j + P_j = \rho_j \cdot C_j \cdot V_j \cdot \frac{dT_{aj}}{dt}$$

T_{aj} : température d'air de la zone j [K]

C_j : chaleur massique de l'air de la zone j kJ.kg

ρ_j : masse volumique de la zone j

V_j : volume de la zone j m

G_j : apports sensibles gratuits de la zone j [w]

P_j : puissance de climatisation [W]

Q_{kj} : débit massique d'air qui passe de la zone k à la zone j [$m^3 \cdot s^{-1}$]

Q_{tj} : débit massique total sortant de la zone j [$m^3 \cdot s^{-1}$]

Elle traduit le fait que l'évolution de la température de l'air de la zone est conditionnée par les échanges convectifs avec les différentes parois et le cas échéant par les débits d'air entrant et sortant de la zone, par la puissance apportée par un système de climatisation et par les charges internes (occupants, appareils).

Dans notre cas sans débit interzone, sans climatisation et sans charges internes, on aboutit à la relation simplifiée suivante:

$$\sum_{p=1}^n h_{ci} \cdot S_p \cdot (T_{i,p} - T_{aj}) = \rho_j \cdot C_j \cdot V_j \cdot \frac{dT_{aj}}{dt}$$

* *CAS MONOZONE*

Les équations vues précédemment concernent les phénomènes entrant en jeu dans le problème thermique global d'un bâtiment donné ; la mise en équation de celui-ci est basée d'une part sur les bilans énergétiques des surfaces intérieures et extérieures de toutes les parois du bâtiment et d'autre part sur le bilan thermo- convectif du noeud d'air de la zone considérée, comme l'illustre le synoptique de la Figure 3.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

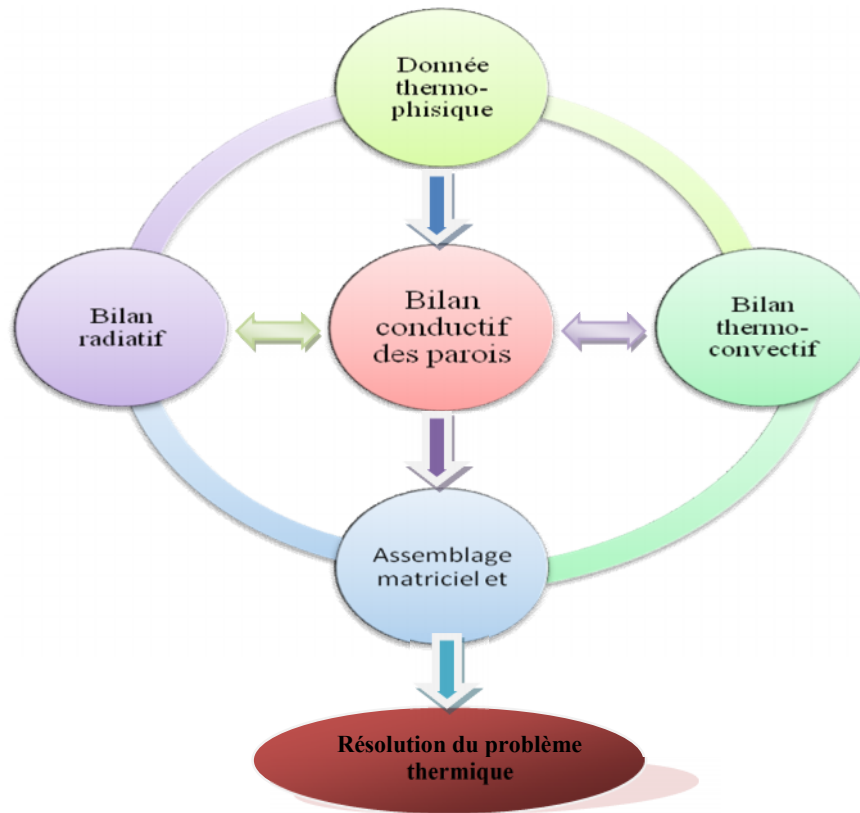


Figure 3 : Synoptique de la résolution du problème thermique global d'une zone

On peut écrire les relations précédentes comme un système matriciel sous la forme générale suivante :

$$[\dot{T}] = [K] \cdot [T] + [C] \cdot [U]$$

* CAS MULTIZONE

La prise en compte du caractère multizone amène à la définition d'un type particulier de paroi : la paroi interzone, qui constitue l'interface entre deux zones voisines et doit de fait prendre en compte les conditions aux limites données par les deux zones qu'elle sépare. Ainsi, à la différence d'une paroi de type extérieure, la condition aux limites extérieure, déduite de l'équation de bilan thermique de surface de la paroi, aura une expression similaire à celle de la condition de la face intérieure, exception faite des noeuds de température à prendre en compte.

En effet, pour une telle paroi, il sera nécessaire de considérer pour le bilan thermique de la face extérieure, la température sèche d'air et la température radiante moyenne de la zone adjacente.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

La description multizone nécessite donc le couplage thermique des différentes zones du bâtiment, plus ou moins fin en fonction de la stratégie adoptée. En effet, deux types de couplages sont généralement utilisés:

- Le couplage "parfait", qui consiste en l'écriture de l'ensemble des relations pour le bâtiment entier, c'est à dire pour chacune des zones, sous la forme d'un seul système matriciel

- Le couplage "connecté" [Smith-Schneider, 1994], qui consiste en l'écriture de systèmes matriciels dont le couplage est assuré par un processus itératif, conditionné par un critère de précision arbitraire

IV- RELATION INTERVENANT DANS LA MODELISATION DU TRANSFERT AERAIQUE DE LA MAISON

1. Introduction

Un bâtiment bien conçu est un bâtiment dans lequel l'air circule correctement dans toutes les pièces, permettant alors un brassage de l'air convenable, et évitant de ce fait l'apparition de facteurs d'insalubrité. Il est donc important de connaître le comportement des écoulements d'air dans les bâtiments, de manière à pouvoir les intégrer dans une démarche globale visant à rendre les bâtiments performants et confortables.

Donc les transferts aérauliques sont d'importance dans le domaine de la physique de l'habitat, car associés aux transferts de chaleur, ils conditionnent le couplage thermique entre les différentes zones et influencent de ce fait les sensations de confort thermique [Cacavelli, 1988] [Roldan, 1985] [Boyer, 1993] [Mora 2003] [Bahroun 2006].

Cependant, la prise en compte fine des écoulements d'air nécessite le recours à des modélisations à échelle microscopique et à des codes de calcul permettent de déterminer le champ de vitesse et de pression de l'écoulement en s'appuyant sur les équations de bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie (code CFD). Ils engendrent néanmoins des temps de calcul importants et fournissent une quantité d'information qu'il est difficile de valider expérimentalement à l'échelle d'un bâtiment. Les principales hypothèses considérées consistent en outre à négliger la viscosité de l'air et à appliquer

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

l'approximation de Boussinesq. En physique du bâtiment, l'approche précédente est utilisée dans le cas d'études fines d'écoulements d'air pour des géométries simples. Les codes de simulation du comportement énergétique des bâtiments ont recours à une modélisation plus simplifiée, reposant sur l'hypothèse d'un régime stationnaire [Smith-Schneider, 1994]. L'équation de quantité de mouvement revêt alors la forme de l'équation de Bernouilli :

$$1/2 \rho V^2 + P + \rho.g.z = \text{constante}$$

avec

V : la vitesse de l'écoulement [m.s⁻¹]

p : la pression [pa]

ρ : la masse volumique [kg m⁻³]

g : l'accélération de la gravité [m/s²]

z : cote du point [m]

Cette équation régit la conservation des pressions dynamiques, statiques et gravitationnelles le long d'une ligne de courant, sur laquelle la masse volumique est constante. Elle met en évidence les moteurs des transferts aérauliques :

- Les effets du vent
- Les effets des systèmes mécaniques
- Les effets de tirage thermique

2- Les effets du vent

La pression aérodynamique exercée par le vent sur un obstacle a pour expression

$$P_{\text{mdy}} = \rho V_m^2 / 2$$

avec

P_{mdy} : pression moyenne dynamique du vent [Pa]

ρ : masse volumique de l'air [kg m⁻³]

V_m : vitesse moyenne du vent [m s⁻¹]

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

La pression du vent intervenant sur la paroi est donnée par

$$P_v = C_p P_{mdy}$$

C_p est la valeur du coefficient de pression en fonction de l'angle d'incidence du vent ; nous citerons à titre d'exemple le modèle de Walton [Krauss, 1989], qui propose les expressions suivantes

$$C_p = 0,75 - 1,05 \alpha / 90 \quad \alpha \in [0,90]$$

$$C_p = -0,45 + 0,15 \alpha / 90 \quad \alpha \in [90,180]$$

3- La modélisation des ouvertures

a- Introduction

Le lien entre les effets du vent et la répartition de l'air au sein du bâtiment est effectué par les ouvertures (liens aérauliques), qui vont canaliser l'écoulement fluide.

En fonction de la taille des ouvertures, l'écoulement d'air, en particulier sa direction, peut être modifié ; en effet, dans le cas d'un lien de faibles dimensions, l'écoulement d'air ne peut avoir lieu que dans un sens ; par contre, si les dimensions sont plus importantes, l'écoulement peut simultanément être présent dans les deux sens.

L'effet précédent est pris en compte au travers d'une distinction particulière des liens aérauliques et de manière implicite des types de modélisation associés. On distingue à cet effet en physique du bâtiment :

- Les grandes ouvertures
- Les petites ouvertures

Les petites ouvertures font l'objet d'une modélisation relativement simple, basée sur l'équation de débit. Pour les grandes ouvertures en revanche, la modélisation est plus complexe et plusieurs approches sont proposées, dont l'objet est la prise en compte réaliste du sens fluctuant de l'écoulement au travers de l'ouverture [Walton, 1982]. Dans le paragraphe qui suit, nous ne nous intéressons qu'à la modélisation des petites

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

ouvertures dans la mesure où seul ce type de lien est intégré à notre environnement de modélisation.

b- Les petites ouvertures

On regroupe sous cette appellation générique l'ensemble des liens aérauliques volontaires ou involontaires qui peuvent apparaître dans le bâtiment ; en effet, les fissures ou des défauts d'étanchéité (par exemple aux liaisons entre les jambages et les cadres des menuiseries) constituent des interstices qui vont être le siège d'un écoulement fluide involontaire.

Par ailleurs, les bouches de ventilation par exemple constituent des discontinuités volontaires dans l'enveloppe du bâtiment qui vont également générer un écoulement fluide. Le couplage énergétique fort du à ces liens entre les diverses zones du bâtiment ou entre les zones et l'extérieur, impose qu'ils soient convenablement pris en compte, notamment au travers du calcul du débit de l'écoulement fluide :

Le débit de fluide à travers une ouverture (petite), est lié à l'écart de pression entre ses deux extrémités ; des études expérimentales ont permis d'obtenir des lois du type :

$$\dot{Q} = K.(\Delta P)^n$$

avec

\dot{Q} : débit volumique à travers l'ouverture

K : perméabilité

ΔP : écart de température des deux cotés de l'ouverture

n : l'exposant de l'écoulement

on a

n = 1 écoulement laminaire

n = 0.5 écoulement turbulent

n = 0.67 valeur courante

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

La forme générale ci-dessus est très largement utilisée pour caractériser les écoulements dans de petites ouvertures ; néanmoins, d'autres types de lois existent, telles les relations polynomiales [Smith- Schneider, 1994].

L'écart de pression dépend, dans le cas d'une description multizone des bâtiments, de l'ouverture considérée. En effet, on distingue les ouvertures extérieures, qui relient une zone du bâtiment à l'extérieur, et les ouvertures intérieures, entre deux zones du bâtiment. L'écriture de la relation de Bernoulli pour chacun de ces deux types de liens aérauliques mène à la l'explicitation des relations donnant l'écart de pression

4- Résolution du problème aéraulique

Pour une zone donnée, le lien entre les débits au travers de toutes les ouvertures est effectué en écrivant la conservation du débit massique :

$$\sum_{o=1}^{N_o} \dot{Q}_o + \dot{Q}_{VMC} = 0$$

avec

$$\begin{cases} N_o : \text{nombre d'ouverture dans la zone} \\ \dot{Q}_{VMC} : \text{débit lié à une ventilation mécanique contrôlée} \end{cases}$$

Ainsi, le débit dû aux systèmes de ventilation mécanique vient s'ajouter en valeur algébrique aux débits à travers les petites ouvertures.

Dans le cas multizone, le bilan ci-dessus doit être écrit pour l'ensemble des zones, ce qui

$$\text{mène alors au système d'équations suivant : } \left\{ \begin{array}{l} \sum_{o=1}^{N_{o,1}} \dot{Q}_{o,1} + \dot{Q}_{VMC,1} = 0 \\ \sum_{o=1}^{N_{o,2}} \dot{Q}_{o,2} + \dot{Q}_{VMC,2} = 0 \\ \dots \\ \sum_{o=1}^{N_{o,n}} \dot{Q}_{o,n} + \dot{Q}_{VMC,n} = 0 \end{array} \right.$$

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

La réécriture de ce système en prenant pour inconnues les pressions, mène à un système non linéaire, qui une fois résolu, fournit les pressions de référence de chaque zone du bâtiment ; en réécrivant le système en débits cette fois-ci, et en injectant les valeurs trouvées pour les pressions, on peut ainsi déterminer les débits au travers de toutes les ouvertures du bâtiment.

V- RELATION INTERVENANT DANS LA MODELISATION HYDRIQUES DE LA MAISON

De nombreux travaux ont été entrepris au cours des années précédentes, pour étudier les manifestations possibles de l'humidité à l'intérieur des bâtiments, et notamment ses impacts sur les consommations d'énergie et sur le confort. Nous pouvons citer deux manifestations importantes, les ateliers d'AIVC Airbone Moisiture Transfert en 1987 [AIVC.87] et l'édition en 1991 de l'annexe 14 de l'Agence Internationale de l'Energie intitulée Condensation and Energy [IEA.9]. Ces manifestations reflètent une prise de conscience au sein de la communauté scientifique de l'importance de l'humidité à l'intérieur des bâtiments.

Depuis plusieurs programmes de recherche ont été lancés, permettant d'apporter des connaissances, notamment sur les transferts de vapeur à travers les enveloppes des bâtiments.

L'importance de l'humidité pour le confort des gens et aujourd'hui largement reconnue. Toutefois, ce n'est pas la seule situation où l'humidité ne doit pas être négligée. Voici des exemples de cas où les critères liés à l'humidité jouent un rôle important :

- *pour assurer le confort des gens* : pour un air très sec (humidité relative inférieure à 40% environ) une sensation désagréable de sécheresse s'accompagne de fréquentes décharges électrostatiques. L'humidité relative élevée (supérieure à 70%), accompagnée de températures hautes provoque une sensation de lourdeur d'étouffement. L'humidité relative élevée avec des températures basses cause une sensation de froid pénétrant.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

- *pour protéger les matériaux* : l'humidité relative élevée, par temps froid, est à l'origine de la condensation sur les surfaces froides ou même à l'intérieur des matériaux. Cette situation peut entraîner une détérioration précoce des matériaux.
- *pour prévenir le développement de micro-organisme*

Les modèles hydriques, à l'instar des modèles thermiques et aérauliques, sont de degré de finesse variable, en fonction des phénomènes pris en compte. On distingue ainsi les modèles intégrant l'effet des matériaux de l'enveloppe sur la teneur en eau de l'air et ceux ne considérant aucune interaction entre l'air et les matériaux. Dans ce dernier cas, les transferts hydriques sont supposés être uniquement dus à un transport convectif par les flux aérauliques.

Dans le cas où les matériaux sont pris en compte, plusieurs approches sont considérées ; on distingue les modèles dits détaillés, distinguant l'effet des parois et permettant l'évaluation du risque de condensation et les modèles plus simplifiés, globalisant l'ensemble des matériaux sous la forme d'un tampon ou « buffer », et donnant une indication de la quantité d'eau stockée [Lucas, 2001]. Ces derniers sont généralement des modèles dits à paramètres ajustés, et ont été élaborés sur la base d'expériences. Ils offrent une vision simplifiée du comportement hydrique des enveloppes, qui possède l'avantage de nécessiter peu de paramètres. Ils peuvent ainsi être mis à profit en phase d'avant-projet d'une opération.

Nous présentons dans la suite un modèle détaillé, développé par Lucas [Lucas, 2001]. Ce modèle, dit « modèle de paroi », distingue le comportement hydrique des parois de l'enveloppe et prend en compte l'interaction air/matériaux dont l'importance est non négligeable. En outre, ce modèle est implémenté dans l'environnement de modélisation que nous présenterons prochainement.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

1- LE MODELE DE PAROI

Ce modèle, dit détaillé [Lucas 2004], offre les avantages suivants :

- Prédiction des quantités d'eau condensées
- Prise en compte des quantités d'eau condensées dans le bilan thermo- convectif de l'air
- Prise en compte fine du couplage thermo- hydrique

La prise en compte des parois dans les transferts hydriques au sein d'une zone donnée, amène à distinguer les parois dites hygroscopiques, de celles non hygroscopiques.

Les premières sont caractérisées par un faible diamètre de pore ($<0,1\mu\text{m}$), nécessitant de ce fait la prise en compte de la diffusion d'humidité (vapeur d'eau). Les secondes sont quant à elles caractérisées par un diamètre de pore plus élevé ($>0,1\mu\text{m}$) occasionnant un transfert d'humidité par capillarité. Dans ce dernier cas, le moteur du transfert est le gradient de pression capillaire, tandis que dans le premier cas, l'humidité se propage sous l'action combinée d'un gradient de température et de concentration.

De manière générale, le bilan hydrique de l'air d'une zone donnée s'exprime de la manière suivante :

$$\rho_{as} \cdot V_z \cdot \frac{dw_z}{dt} = \sum_{n=1}^{N_{z+1}} m_{as_{n,z}} \cdot w_z + \frac{\dot{Q}_{lat}}{L_v} + \frac{CL_{lat}}{L_v} + F_{tampon} + \underbrace{F_{parois-hygro} + F_{parois non hygro}}_1$$

Les termes (1) regroupent d'une part les flux échangés entre l'air et les parois hygroscopiques et d'autre part, entre l'air et les parois non hygroscopiques en présence de condensation.

2- PAROIS HYGROSCOPIQUES

Pour ce type de paroi, le modèle distingue le cas où la paroi est sèche (sans condensation superficielle) et celui où la paroi est humide (présence de condensas). Le formalisme utilisé est basé sur l'analogie thermo- électrique, dont l'illustration est proposée sur la Figure suivante.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

Le terme lié aux parois hygroscopiques dans l'expression générale du bilan hydrique de la zone d'écrit alors :

$$F_{\text{parois hygro}} = \sum_s^{N_{p,s}} F_{p,s\acute{e}che,s} + \sum_h^{N_{p,h}} F_{p,cond,h}$$

N_{ps} : nombre de parois sèches

N_{ph} : nombre de parois humides

$F_{p,s\acute{e}che}$: flux massique de parois sèches [kg.s⁻¹]

$F_{p,cond}$: flux massique de parois humides [kg.s⁻¹]

a- Cas d'une paroi sèche

Dans ce cas, le flux hydrique échangé par l'air s'exprime par la relation suivante :

$$F_{p,s\acute{e}che,g} = h_{m,vap} \cdot S_g \cdot (w_{p,g} - w)$$

La loi d'évolution de la teneur en eau d'une telle paroi est quand à elle donnée par une équation différentielle :

$$\rho_g V_g C_{hg} \frac{dw_{p,g}}{dt} = -h_{m,vap} S_g (w_{p,g} - w)$$

avec

ρ_g : masse volumique du matériau de la paroi [kg.m⁻³]

V_s : volume de la paroi concernée par les transferts [m³]

S_g : surface de la paroi concernée par les transferts [m²]

$C_{h,g}$: capacité hydrique de la paroi [kg_{eau}. kg_{matériau}⁻¹]

$w_{p,g}$: teneur en eau de l'air dans la paroi [kg_{eau}. kg_{air sec}⁻¹]

$h_{m,vap}$: coefficient d'échange massique à la surface du matériau [kg_{air sec}⁻¹.m².s⁻¹]

w : teneur en eau de l'air de la zone [kg_{eau}. kg_{air sec}⁻¹]

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

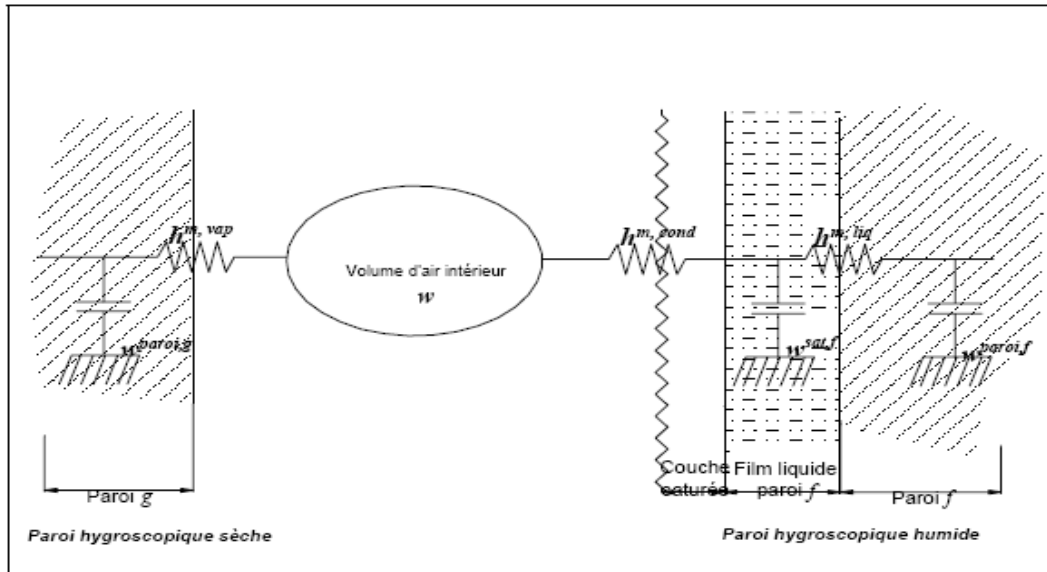


Figure 4 : Formalisme du modèle de la paroi dans le cas hygroscopique

b- Cas d'une paroi humide

Dans ce cas, il existe un film de condensas sur la paroi et il y a lieu de tenir compte des éléments suivants :

- Echange en phase vapeur air/film
- Echange en phase liquide film/paroi

Dans le premier cas, le flux s'exprime de manière analogue à celui d'une paroi sèche, selon la relation suivante :

$$F_{p,cond,f} = h_{m,vap} S_f (w_{p,f,sat} - w)$$

L'indice «sat» indiquant la surface saturée du film.

Le second échange, fonction de la pression capillaire P_{cap} , s'exprime sous la forme de la loi de Jurin :

$$dP_{cap} = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r_p}$$

Le flux massique échangé par la couche liquide est alors donné par la relation :

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

$$F_{p,liq,r} = \varphi_{p,liq,f} S_f = -K_{m,p} \frac{\partial P_{cap}}{dx} S_f = -K_{m,p} S_f \cdot \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r_p \cdot e_{act}}$$

avec les notations suivantes :

$\varphi_{p,liq,f}$: densité de flux massique échangée par la couche liquide [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

$\sigma : 72 \cdot 10^{-3}$: tension superficielle de l'eau à 20° C [N.m]

$\theta=0$: angle de mouillage ou angle d'accroche de l'eau [°]

r_p : rayon des pores du matériau en surface de la paroi [m]

e_{act} : épaisseur active du matériau concerné par les transferts en phase liquide [m]

$K_{m,p}$: perméabilité à l'eau liquide du matériau de la paroi [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$].

L'épaisseur active est également appelée profondeur effective de pénétration et correspond à la zone du matériau affectée par les échanges hydriques. Elle est de l'ordre de quelques millimètres et la valeur 4mm est généralement admise. En introduisant ces simplifications, la relation précédente devient :

$$F_{p,liq,f} = -0.144 \frac{K_{m,p} \cdot S_f}{r_p \cdot e_{act}} = -0.144 \cdot \frac{K'_{m,p} \cdot S_f}{e_{act}}$$

avec

$F_{p,liq,f}$: flux massique [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$K'_{m,p} = \frac{K_{m,p}}{r} [\text{kg} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$$

La masse liquide à la surface de la paroi est donnée par la relation :

$$\frac{dm_{liq,p,f}}{dt} = -f_{p,cond,f} + F_{p,liq,f} = -h_{m,vap} S_f (w_{p,f,sat} - w) - 36 \cdot S_f \frac{K_{m,p}}{r_p}$$

quand à l'évolution de la teneur en eau de l'air de la paroi par:

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

$$\rho_f V_f C_{h,f} \frac{dw_{p,f}}{dt} = 36 \cdot S_f \cdot K'_{m,p}$$

IV- COUPLAGE THERMO- HYDRIQUE

Les phénomènes thermiques et hydriques sont couplés au travers de l'équation de bilan sensible du noeud d'air de la zone concernée d'une part, et d'autre part au travers de l'énergie de changement de phase associée aux parois humides de la zone.

Les relations traduisant ce couplage sont

**** Couplage au niveau du bilan sensible du noeud d'air :**

$$\rho_{as} \cdot C_{p_{as}} \cdot V_z \frac{dT_{ai,z}}{dt} = \sum_{j=1}^{Np(z)} h_{ci} \cdot S_j \cdot (T_{i,z} - T_{ai,z}) + \sum_{n=1}^{Nz+1} m_{as(n,z)} \cdot C_{p_{as}} \cdot T_{ai,n} - \sum_{n=1}^{Nz+1} m_{as(z,n)} \cdot C_{p_{as}} \cdot T_{ai,z} + \dot{Q}_{sens} + Cl_{sens}$$

$$\underbrace{\sum_{n=1}^{Nz+1} m_{as(n,z)} \cdot C_{pv} \cdot w_n \cdot T_n - \sum_{n=1}^{Nz+1} m_{as(z,n)} \cdot C_{pv} \cdot w_z \cdot T_z}_{\text{termes de couplage thermo-hydrique liés aux transferts aérauliques}} + \underbrace{\sum_{f=1}^{nbre\ parois\ sèches} m_{vap,g} \cdot C_{pv} \cdot [T_{s,g} - T_{ai,z}]}_{\text{échange entre l'air et les parois sèches}}$$

$$\underbrace{\sum_{f=1}^{nbre\ parois\ humide} m_{liq,f} \cdot C_{pv} \cdot [T_{s,f} - T_{ai,z}]}_{\text{échange entre l'air et les parois humides}}$$

**** Couplage au niveau du bilan énergétique surfacique des parois :**

$$C_f \frac{dT}{dt} = F_{conductif} + F_{convectif} + F_{radiatif\ SW} + F_{radiatif\ LW} + \frac{F_{p,cond,f}}{S_f} l_v$$

CONCLUSION

Nous avons tenu lors de ce chapitre, à présenter l'ensemble des relations nécessaires à la modélisation thermo- hygro- aéraulique des maisons thermo solaires. Celles-ci sont en effet fondamentales lors de l'élaboration d'un outil de modélisation.

Outre les aspects équationnels proprement dits, le passage des équations manuscrites à l'implémentation ne se fait pas immédiatement ; il est en effet nécessaire d'avoir une réflexion préalable sur l'approche qu'il faut adopter lors de l'implémentation, car elle va

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

conditionner l'évolutivité du code. Le caractère générique en particulier, nécessite une attention de tous les instants.

La mise en place des systèmes matriciels pour une configuration donnée, figée, est certes délicate, mais réalisable relativement rapidement. La génération automatique et non définie à l'avance de systèmes matriciels quant à elle, est plus exigeante et plus longue. Cependant, en fonction de l'environnement de développement, les outils mis à disposition permettent d'accélérer la démarche et de vérifier plus rapidement d'éventuelles erreurs.

Néanmoins, les efforts fournis pour la mise en place d'un générateur de modèles sont gratifiants, dans la mesure où la possibilité est offerte de traduire les phénomènes intervenants dans une infinité de configurations possibles. Cette caractéristique permet ainsi une large utilisation.

Enfin, du point de vue algorithmique, les codes de simulation du comportement énergétique des maisons réalisent un couplage plus ou moins fin des modèles thermiques, hydrique et aérauliques ; les stratégies de couplage sont donc variées et l'on distingue celles dites « directes » de celles dites « itératives », illustrés sur la Figure suivante. Les premières sont considérées comme parfaites, dans la mesure où l'ensemble des relations mathématiques traduisant les phénomènes physiques sont résolues en même temps. La simultanéité de la résolution par système matriciel global assure un couplage fin des phénomènes. La seconde méthode réalise un couplage plus approximatif, mais offre l'avantage de permettre une modulation de ce dernier par l'intermédiaire du critère de précision à prendre en compte.

Pour une revue détaillée des stratégies de couplage, se référer à [Smith- Schneider, 1994] et [Wolosyn, 1999].

Ce cadre de modélisation étant fixé, nous présentons dans le chapitre suivant l'environnement de modélisation qui fait l'objet de notre méthodologie, dans son volet scientifique. Ce dernier s'apparente à un code de simulation du comportement énergétique des bâtiments et a été développé dans le souci de permettre des études théoriques multiples.

CHAPITRE II MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT

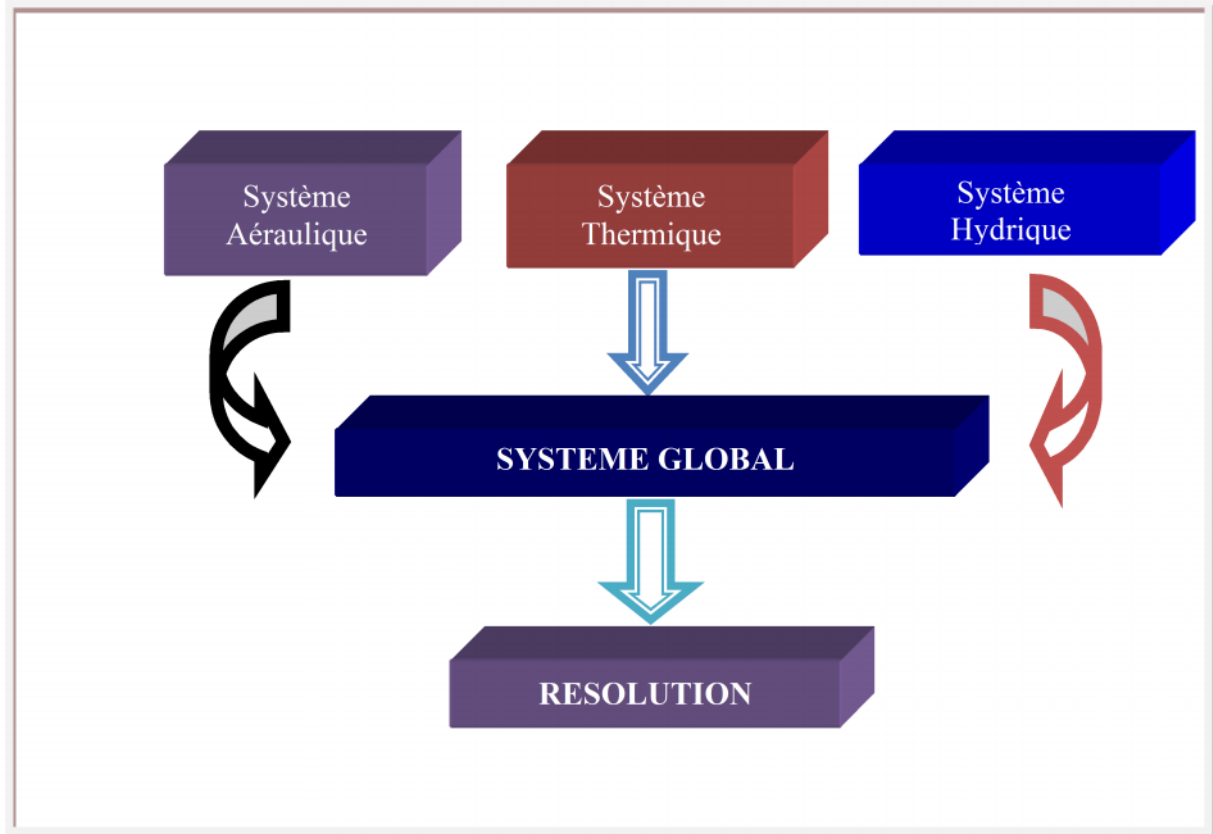


Figure 5 : La stratégie de couplage directe

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

CHAPITRE III



MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXES)

Ce chapitre présente la démarche théorique que nous avons adoptée afin de répondre à la problématique scientifique mentionnée soit la modélisation des énergies incidentes sur une maison thermo- solaire en effet, il débute par une présentation générale de ce que l'on nomme parois complexes, en soulignant les différentes stratégies de modélisation référencées dans la bibliographie.

Les éléments que nous exposons jettent les bases de l'outil de modélisation que nous avons développé dans le cadre de ces travaux, qui s'apparente à un prototype de code de simulation du comportement énergétique des bâtiments. Les développements spécifiques à la problématique des parois complexes sont ensuite abordés. Après une description de cette dernière, nous proposons une modélisation dite détaillée, réalisée dans la philosophie des codes de simulation du comportement énergétique des bâtiments.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

I- INTRODUCTION

La prise de conscience de la nécessité de réaliser des économies énergétiques a impulsé, dans le domaine du bâtiment, une réflexion globale sur des technologies utilisables afin d'aboutir à des conditions d'ambiance données en consommant le moins d'énergie possible. C'est ainsi qu'a débuté la quête des moyens d'une climatisation dite passive des bâtiments, dont le résultat s'est parfois traduit par un retour à des techniques anciennes de conception architecturales, tombées dans l'oubli dans la course au modernisme. En effet, comme le souligne Bansal [Bansal, 1994], un grand nombre de ces concepts anciens, éprouvés par l'expérience, sont aujourd'hui remis au goût du jour afin d'atteindre des conditions de confort dans les bâtiments.

A contrario des dispositifs de production actifs de chaleur ou de froid, les éléments passifs ne nécessitent aucun apport énergétique et font appel à des moyens naturels afin de moduler les conditions d'ambiance en fonction des sollicitations environnementales et climatiques (rayonnement solaire et dans certains cas ventilation naturelle).

Citons à titre illustratif concernant la problématique locale liée au couple ensoleillement/ventilation, les menuiseries de type « jalousies » qui permettent de moduler la ventilation naturelle dans le bâtiment tout en régulant la transmission des rayons solaires grâce à des lames opaques. Cet exemple n'illustre bien entendu que l'une des techniques de climatisation passive, mais a le mérite de montrer que des dispositifs simples et relativement peu onéreux permettent d'atteindre les objectifs escomptés.

Les principales cibles de la conception bioclimatique des bâtiments sont :

- La sélection du site d'implantation du bâtiment
- L'orientation du bâtiment, par rapport à l'ensoleillement et au vent
- La détermination de la course du soleil, qui conditionne les dispositifs de masques ou au contraire ceux favorisant l'apport solaire
- L'agencement et la forme du bâtiment
- La position et la taille des ouvertures
- La sélection des matériaux constitutifs du bâtiment

C'est au départ de cet ensemble de critères que vont être élaborées les solutions architecturales et technologiques passives, favorisant l'habitat bioclimatique et de haute

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

qualité environnementale. Comme le souligne Garde [Garde, 2001 et 2006], ces préoccupations font désormais partie intégrante du faisceau de critères que doit prendre en compte l'architecte dans l'élaboration d'un projet.

II- DESCRIPTION DES PAROIS COMPLEXES

Les parois à comportement complexe font apparaître dans leur composition un nombre donné d'isolants de lames d'air, délimitées par des matériaux identiques ou non. Elles se distinguent ainsi des parois ordinaires, qui dans le cas le plus élaboré, sont constituées d'un assemblage de matériaux différents, qui leur vaut alors le qualificatif de « multicouche ».

Les particularités liées à la présence de lames d'air s'expriment au travers de la nature des phénomènes physiques à prendre en compte d'une part, mais également de la configuration considérée qui va conditionner le degré de couplage des phénomènes physiques mis en jeu.

La lame d'air va être le siège, dans le cas le plus simple, d'un ensemble de transferts thermiques couplés conduction/convection/rayonnement. La part respective de ces transferts est de plus conditionnée par l'orientation de la paroi : horizontale, le transfert conductif est prépondérant si la paroi est sollicitée en flux sur sa face supérieure, tandis que le transfert convectif prendra une part plus importante si la sollicitation est imposée sur la face inférieure.

De plus, l'état de surface des matériaux joue également un rôle : si par exemple, les extrémités de la lame d'air sont réfléchissantes, la part radiative des transferts va être largement amoindrie. Supposons maintenant que nous ventilions la lame d'air ; le transfert énergétique global par la paroi fait là encore intervenir des transferts couplés, mais de nature différente, thermiques et aérauliques. La part respective des phénomènes va être là encore considérablement affectée.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

Pour cela ; on ne pourra ignorer la particularité des parois complexes, dont la constitution, l'orientation et la configuration jouent un rôle non seulement sur la nature des transferts énergétiques mis en jeu, mais également sur leur part respective et leur degré de couplage.

III- PRESENTATION DE QUELQUES PAROIS A COMPORTEMENT COMPLEXE

Nous présentons dans ce paragraphe quelques exemples parmi les plus connus de parois complexes passives (sans système thermodynamique supplémentaire), dont l'efficacité a été éprouvée. Nous verrons dans un premier temps le mur Trombe et ses dérivés, puis le principe d'un bardage thermique, utilisé en climats chauds et enfin une structure double- paroi intégrant un élément textile.

1. Le mur trombe et ses dérivés

Le mur Trombe et ses dérivés font partie des parois complexes utilisées en isolation dynamique des bâtiments. Les trois types de parois que nous allons considérer sont basés sur la même configuration, dont les éléments constitutifs sont les suivants (cf. figure 1) :

- L'âme de la paroi, qui constitue le matériau central ; il est généralement composé d'un ou plusieurs matériaux homogène (1)
- Des matériaux extrêmes supérieur et inférieur, qui sont le prolongement direct des parois du bâtiment (2 et 2')
- Une couverture extérieure, composée d'un double-vitrage ou d'un simple vitrage (3) associé à une occultation se déroulant en face extérieure (6), généralement opaque aux rayonnements de courte longueur d'onde
- D'une lame d'air verticale, délimitée par la couverture, l'âme de la paroi et les matériaux extrêmes hauts et bas (4)
- Des lames d'air horizontales, en partie supérieure et inférieure de la paroi (5 et 5')

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

Différents orifices permettant la libre circulation de l'air conditionnant le comportement thermique global de la paroi ; ainsi dans le premier cas de la figure 1, aucune circulation d'air n'est possible entre la lame d'air verticale et le bâtiment ; c'est le mur à effet de serre. Dans le second cas, un recyclage de l'air intérieur du bâtiment est assuré par la paroi complexe, grâce à une prise d'air interne ; c'est le mur Trombe. Enfin, dans le troisième cas, un préchauffage d'air neuf est assuré par la paroi complexe, grâce à une prise d'air externe et l'injection d'air a lieu dans le bâtiment ; c'est la paroi à effet pariéto- dynamique ; si la couverture extérieure est un vitrage, elle est appelée paroi héliodynamique.

Ces trois types de parois sont utilisées pour le réchauffage en hiver et utilisent les forces de gravités pour entraîner les mouvements d'air ; une ventilation mécanique est en outre envisageable. Cependant, ces parois peuvent également être utilisées l'été, afin de rafraîchir l'air des bâtiments ; il suffit en effet de configurer les orifices de telle sorte que les mouvements d'air décrits sur la figure 2 soient générés.

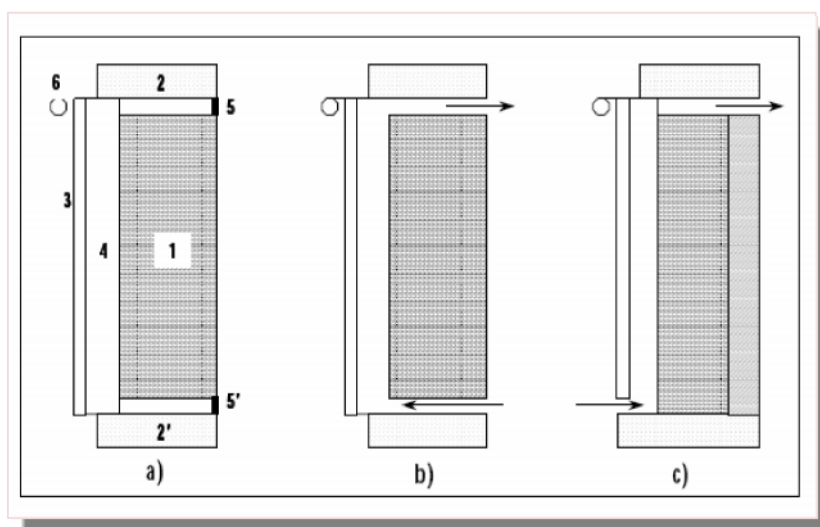


Figure 1 : Vue en coupe a) mur à effet de serre b) mur Trombe c) paroi héliodynamique

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

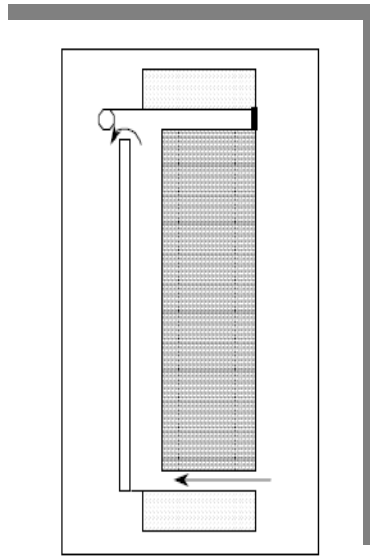


Figure 2 : Mur Trombe en configuration estivale

Ces technologies passives peuvent donc être avantageusement mises à profit pour rafraîchir ou réchauffer une ambiance, selon les besoins.

2- Le principe du bardage thermique [Yerro, 1997]

Le bardage thermique [Yerro, 1997] exploite également l'effet de cheminée ou de thermosiphon vu précédemment, au travers d'un concept dont le principe est la superposition au droit d'une paroi à protéger d'un autre matériau fortement conducteur de chaleur, de sorte à réaliser un canal d'air. Ce dernier a pour rôle d'assurer l'évacuation des apports solaires, afin de limiter les gains énergétiques vers le bâtiment.

Plusieurs configurations sont là encore possibles, permettant l'utilisation du bardage en isolation dynamique d'une part, mais également comme moyen d'assurer le renouvellement d'air d'une ambiance. La figure 3 illustre ces deux configurations : dans le premier cas (à gauche), le bardage thermique génère par effet gravitationnel un mouvement d'air déconnecté de l'ambiance. Dans le second cas (à droite), l'air de l'ambiance est renouvelé grâce à des orifices lui permettant de s'extraire de l'enveloppe du bâtiment.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

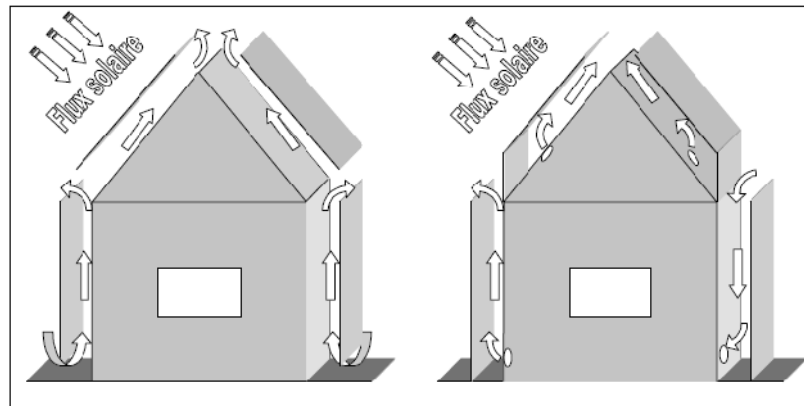


Figure 3 : *Fonctionnement d'un bardage thermique, à gauche sans ventilation intérieure et à droite avec ventilation intérieure*

Dans ce cas, la paroi dite complexe est constituée de l'ensemble bardage thermique/lame d'air/paroi de l'enveloppe du bâtiment concernée. Ce type de paroi est utilisé aux Antilles, dont le climat, de type tropical humide, impose des sollicitations extrêmes sur les bâtiments [Yerro, 1997].

3- Les systèmes de surtoiture textiles [duta, 1998]

** La structure double paroi à élément textile*

Ce dernier exemple de paroi complexe est basé sur le même principe que le bardage thermique ; la encore, il s'agit de superposer un matériau à une paroi de bâtiment, afin de le protéger des rayons solaires d'une part, mais également d'évacuer les apports énergétiques grâce au canal d'air ainsi constitué. Cependant, la particularité de ce système est qu'il intègre un élément textile, plus précisément une toile perforée. L'avantage de cette dernière est qu'elle permet, en plus de l'écoulement d'air dans le canal, une évacuation de l'air par ses perforations et également une plus grande transmission d'énergie lumineuse [Duta, 1998].

IV- MODELISATION DES PAROIS COMPLEXES

Compte tenu des éléments précédents, il est clair que les parois à comportement complexe font intervenir des phénomènes couplés, de natures diverses en fonction des

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

configurations données. La modélisation de ces systèmes est donc plus délicate et constitue l'objet de plusieurs approches.

a- Les approches de modélisation dans la littérature

Les travaux de Breton concernant les parois complexe de type mur Trombe [Breton, 1986], nous propose deux approches de modélisation, qui diffèrent par le degré de finesse du couplage au bâtiment.

En premier il procède à la modélisation fine de la paroi complexe seule, puis opère au couplage de la paroi au bâtiment. Ce dernier est dans un premier temps réalisé sommairement, le bâtiment étant représenté uniquement par une température d'air et une température radiante moyenne. L'auteur souligne que cette méthode de couplage est celle la plus fréquemment rencontrée dans la littérature ; tout l'effort de modélisation est consacré à la paroi complexe.

Le second couplage qu'il effectue est selon lui plus réaliste, dans la mesure où le bâtiment est représenté cette fois par l'ensemble du champ des températures de surface, associé à la température d'air et à la température radiante moyenne, et que le couplage aérodynamique est pris en compte.

Le plus intéressant dans la modélisation de Breton sont les transferts conductifs traités de manière bidimensionnelle, les échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'ondes déterminés selon la méthode des radiosités, les facteurs de forme étant évalués selon la méthode de Hottel et enfin les transferts convectifs au plus détaillé, coefficient d'échange donné selon des corrélations adimensionnelles.

Dans la lignée de Breton, Hoang [Hoang, 1990] s'intéresse également aux parois complexes de type mur Trombe, en se focalisant plus précisément sur les écoulements d'air dans la cavité de grand rapport d'allongement que constitue la lame d'air verticale. Il procède dans un premier temps à une modélisation analogue à celle de Breton, et effectue

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

ensuite une étude expérimentale. Il se livre alors à la modélisation à l'échelle des milieux continus d'une cavité de grand rapport d'allongement. Une confrontation modèle/mesures lui permet alors de fixer le régime de convection qui a lieu dans la paroi complexe, déterminé comme étant celui d'une convection mixte. Fort de ce constat, il couple alors le modèle de paroi initial à un bâtiment mono- zone, au travers du logiciel « Tony » [Rôdant, 1985] (dérivé du logiciel américain TRNSYS). Ses conclusions vont dans le sens de la validité des hypothèses mises en évidence, en particulier liées au régime de convection mixte transitoire.

Plus récemment, Gan propose une étude paramétrique de parois de type mur Trombe, utilisées en climatisation passive des bâtiments [Gan, 1998]. Son approche est différente de celle des études précédentes dans la mesure où l'échelle de modélisation considérée est celle de la CFD. Une étude expérimentale est également menée et la comparaison modèle/mesures qui en découle semble conforter la modélisation choisie.

b- Synthèse

Aux vues des approches présentées dans le paragraphe précédent, il semble que les parois complexes aient fait l'objet d'investigations théoriques variées. En effet, on constate que plusieurs échelles de modélisation ont été considérées et que le couplage des modèles de paroi au bâtiment a également été pris en compte.

Cependant, on remarque de manière générale que l'étape de modélisation et celle de couplage du modèle de paroi complexe au bâtiment sont déconnectées. Une telle démarche, si elle semble donner des résultats convenables dans le cas de bâtiments monozones, nous paraît être difficilement applicable à des bâtiments quelconques, le plus souvent multizones. En effet, le modèle étant dissocié du code de calcul, il semble difficile de coupler à posteriori le modèle de paroi, le caractère générique de la modélisation globale étant mis en défaut. Seule une modélisation modulaire permet de pallier en partie à cet inconvénient

Ces codes modulaires ont un principe très séduisant ; il consiste à donner un champ de liberté à l'utilisateur qui peut facilement concevoir divers modèles, représentant un

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

bâtiment complet, une de ses parties ou encore les systèmes qui lui sont associés, l'utilisateur construit son modèle à partir d'un assemblage de modèles élémentaires, qu'il peut soit concevoir lui-même soit obtenir de la bibliographie existante. Le système d'équation engendré par le modèle est résolu par un solveur numérique indépendant.

De plus, l'une des finalités des études théoriques des parois à comportement complexe est leur intégration à des codes de calcul du comportement énergétique des bâtiments. Or comme le mentionne Breton [Breton, 1986] et plus tard [Miranville 2003], la plupart de ces outils ne permettent de traiter que de façon imparfaite de telles parois, dans la mesure où elles nécessitent le traitement fin des transferts énergétiques. Cette lacune des codes de simulation, constatée il y a plus d'une dizaine d'années, tend à être comblée compte tenu des récents développements, qui évoluent vers une approche intégrée et multi-échelle des phénomènes et des systèmes.

Forts de ces constats, et compte tenu de nos objectifs de modélisation générique des parois complexes nous nous sommes orientés vers une approche intégrée, directement inspirée de la philosophie des codes de simulation du comportement énergétique des bâtiments.

V - DEVELOPPEMENTS SPECIFIQUES AUX PAROIS COMPLEXES

La modélisation détaillée des parois complexes nécessite la mise en œuvre de modèles fins des transferts radiatifs et convectifs. Certaines des méthodes rappelées dans le paragraphe précédent font partie des méthodes dites fines et ont fait l'objet de développements spécifiques au sein du code de calcul.

1- Hypothèses

Les relations implémentées dans le code de simulation sont celles qui ont été décrites dans le chapitre précédent. Nous rappelons ici sommairement les principales hypothèses des modèles.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

➤ Le modèle thermique

Le modèle thermique est basé sur une description multizone du bâtiment, et ses principales hypothèses sont les suivantes :

- Concernant la conduction

- * Volumes de contrôle macroscopiques
- * Conduction unidimensionnelle dans les parois
- * Schéma numérique aux différences finies implicites (ordre 1)

- Concernant la convection intérieure

- * Coefficient d'échange convectif constant par paroi
- * Corrélation du type $h_{ci} = a \Delta T^n + b$
- * Corrélations adimensionnelles du type $h_{ci} = f(R)$

- Concernant le rayonnement

Prise en compte multimodèle des échanges par rayonnement de grande longueur d'onde dans les zones

- * Méthode des radiosités
- * Coefficient d'échange radiatif généralisé
- * Coefficient d'échange radiatif constant

- Concernant le volume d'air

- * Milieu non participant (non absorbant)
- * Isothermie

➤ Le modèle hydrique

Le modèle hydrique est implémenté selon les relations développées par Lucas [Lucas, 2001] et permet en outre :

- La prise en compte de l'interaction avec les matériaux

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

- La prédiction des quantités d'eau condensées

➤ Le modèle aéraulique

Le modèle aéraulique est basé sur le modèle intégré au code de calcul CODYRUN [Boyer, 1993] et inclut :

- Le calcul des pressions de référence dans les zones
- Le calcul des débits au travers de petites ouvertures

Nous nous proposons donc dans la suite de détailler l'implémentation de ces relations. Elles concernent les transferts radiatifs de grande longueur d'onde et les transferts convectifs.

A- LES TRANSFERTS RADIATIFS DE GRANDE LONGUEUR D'ONDE

➤ *LA METHODE DES RADIOSITES*

L'objet de la méthode est de traiter le problème des transferts radiatifs de grande longueur d'onde dans une enceinte fermée, sous les hypothèses couramment considérées en thermique du bâtiment et que nous avons rappelées au chapitre 2. Elle fait intervenir les concepts de radiosité, de flux net et de facteur de forme, au travers des relations mathématiques décrites précédemment.

Mentionnons néanmoins que les facteurs de forme doivent pour une enceinte fermée satisfaire aux deux principes fondamentaux indiqués ci-dessous :

- La complémentarité, qui exprime que tout ce qui quitte une surface, doit être interceptée par les autres en imposant que leur somme soit égale à 1 :

$$\sum_{j=1}^N f_{ij} = 1$$

- La réciprocité, permettant de lier les facteurs de forme des différentes parois :

$$S_i f_{ij} = S_j f_{ji}$$

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

Dans la partie suivante nous allons exposer les relations théoriques qui forment le système d'équation qui permet de prendre en compte les transferts radiatifs de grandes longueurs d'onde ; sachant que ce type d'intégration nécessite des relations en formalisme matriciel.

Le système d'équation :

La relation de définition des radiosités, écrite pour l'ensemble des parois d'une enceinte mène à un système d'équations de dimension n_p , n_p , étant le nombre de parois; en effet, par définition, on a pour une paroi indicée p:

$$R_p = \varepsilon_p M_p + (1 - \varepsilon_p) E_p$$

Or l'éclairement est donné par la somme des fractions des énergies quittant les autres parois et arrivant effectivement sur la paroi p, soit :

$$E_p = 1/S_p \sum_{p_1}^{n_p} S_{p_1} f_{p_1 p} R_{p_1} = \sum_{p_1}^{n_p} f_{p_1 p} R_{p_1}$$

Compte tenu du principe de réciprocité

D'où :

$$R_p = \varepsilon_p M_p + (1 - \varepsilon_p) \sum_{p_1}^{n_p} f_{p_1 p} R_{p_1}$$

Finalement nous arrivons à :

$$\sum_{p_1=1}^{n_p} \left[\left(\delta_{pp_1} - (1 - \varepsilon_{pp_1}) f_{pp_1} \right) R_{p_1} \right] = \varepsilon_p M_p^0 = \varepsilon_p \sigma T_i^4$$

On peut l'écrire sous forme matricielle de la forme suivante :

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

$$\begin{aligned}
 X &= \left\{ a_{ij} = \delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i) f_{ij} \right\} \\
 Y &= \left\{ b_{ij} = \varepsilon_i \sigma T_{ij}^4 \right\} \\
 &\text{avec } i, j \in [1, n_p]
 \end{aligned}$$

Le formalisme du système à résoudre est

$$\begin{bmatrix}
 1 - (1 - \varepsilon_1) f_{11} & - (1 - \varepsilon_1) f_{12} & \bullet & - (1 - \varepsilon_1) f_{1n} \\
 1 - (1 - \varepsilon_2) f_{21} & 1 - (1 - \varepsilon_2) f_{22} & \bullet & \bullet \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 - (1 - \varepsilon_n) f_{n1} & \bullet & \bullet & 1 - (1 - \varepsilon_n) f_{nn}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 R_1 \\
 R_2 \\
 \vdots \\
 R_{nn}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \varepsilon_1 \sigma T_{i,1}^4 \\
 \varepsilon_2 \sigma T_{i,2}^4 \\
 \bullet \\
 \varepsilon_n \sigma T_{i,n}^4
 \end{bmatrix}$$

A partir de ça nous pourrions avoir le vecteur des radiosités R qui contient la valeur des radiosités des différentes parois.

Le système d'équation pour flux nets

Par définition, on peut écrire :

$$F_{net,p} = F_{emis,p} - F_{abs,p} = \varepsilon \sigma T_{i,p}^4 - \alpha_p E_p = \varepsilon_p \sigma T_{i,p}^4 - \varepsilon_p A$$

$$A = \left[\frac{R_p - \varepsilon_p \sigma T_{i,p}^4}{1 - \varepsilon_p} \right] \text{ (relation de la définition de la radiosité)}$$

Soit :

$$F_{net,p} = \frac{\varepsilon_p}{1 - \varepsilon_p} (\sigma T_{i,p}^4 - R_p)$$

Donc le flux est donné aisément une fois le vecteur de radiosité obtenu, comme nous pouvons le remarquer le flux nets des parois ainsi les radiosités sont fortement couplés grâce aux températures de surface

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

* INTEGRATION DE LA METHODE DES RADIOSITES

L'insertion de la méthode des radiosités dans le principe de fonctionnement du modèle thermique, va consister en la prise en compte à chaque pas de temps des sollicitations radiatives de grande longueur d'onde dans le système matriciel du modèle thermique de la zone concernée. Or, compte tenu des relations décrites dans les paragraphes précédents, il apparaît que ces sollicitations sont fortement couplées aux températures de surface intérieures des parois de l'enceinte. Ainsi, il convient d'assurer de manière algorithmique le couplage des températures aux flux nets.

Ainsi, après analyse des différentes options possibles, il nous semble intéressant de proposer trois approches du couplage de la méthode:

- *La méthode couplée*, dans laquelle le calcul des flux nets à chaque pas de temps est intégré au vecteur des sollicitations de manière itérative, jusqu'à convergence du champ de température de la zone ; le synoptique associé est celui de la Figure 4

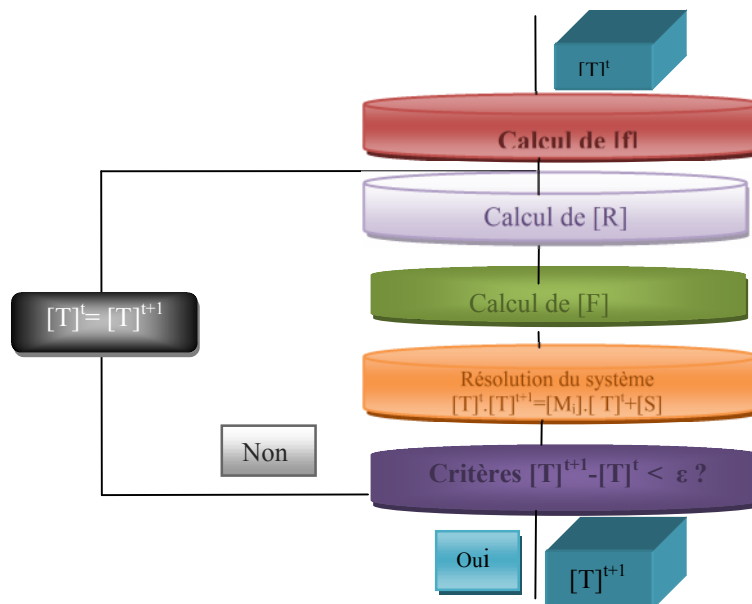


Figure 4: Synoptique de la méthode des radiosités couplée

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

• *La méthode découplée*, dans laquelle les flux nets ne sont itérativement couplés qu'aux températures de surface intérieures des parois, et non au champ complet de température, comme illustré sur la Figure suivante

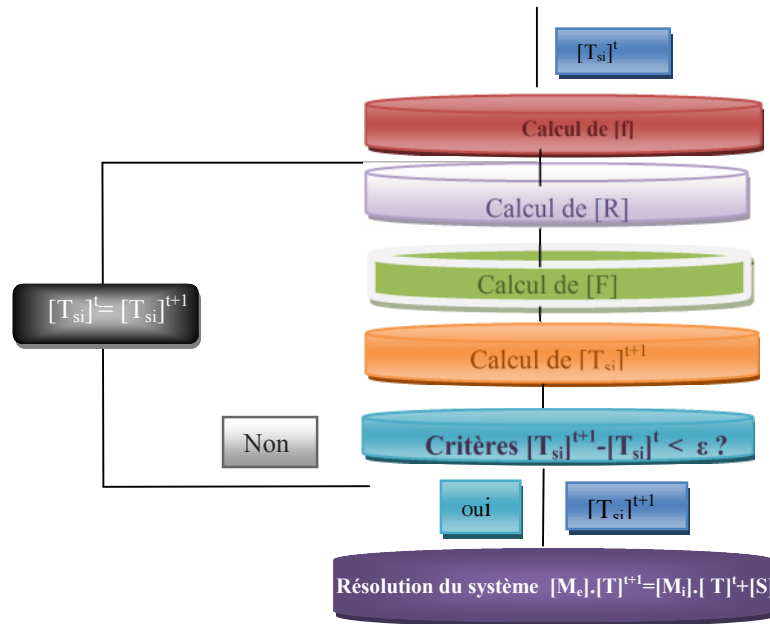


Figure 5 : Synoptique de la méthode des radiosités découplée

• *La méthode décalée*, dans laquelle les flux nets sont simplement calculés au départ des températures du pas de temps précédent et injecté dans le vecteur des sollicitations, selon le synoptique de la Figure 6

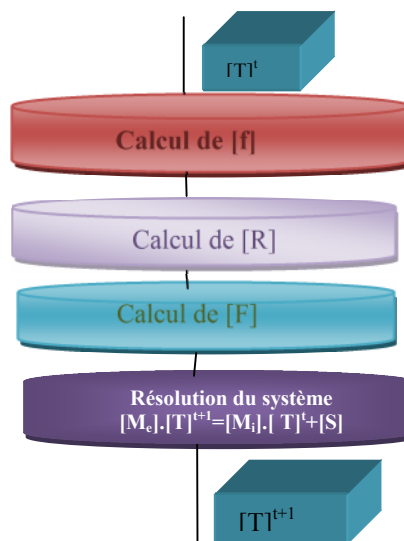


Figure 6 : Synoptique de la méthode des radiosités décalée

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

Ces trois intégrations de la méthode des radiosités ont été effectuées dans la philosophie de l'approche multi- modèle ; par ailleurs, le temps de calcul nécessaire au couplage itératif peut rapidement devenir très important, ce qui nous a conforté dans cette voie ; en effet, les matériaux de constructions des bâtiments possèdent généralement une émissivité élevée ; or c'est ce paramètre qui conditionne le degré de couplage des transferts radiatifs. En conséquence, pour tenir compte finement de ces transferts lors de simulations, il est nécessaire d'utiliser le plus souvent la méthode couplée ; toutefois, en première approche, la méthode décalée peut convenir.

SYNTHESE

La méthode des radiosités permet de prendre en compte de manière détaillée les transferts radiatifs de grande longueur d'onde dans une enceinte. Elle fait intervenir les concepts de radiosité, de flux net et de facteur de forme et mène pour une zone donnée à un système d'équations non linéaires en températures et en flux.

La résolution d'un tel système peut être faite de manière globale ou de manière itérative.

Notre choix s'est porté sur la seconde approche, nous permettant d'avoir une plus grande maîtrise de l'algorithme au travers du critère de convergence.

L'analyse des modalités d'implémentation de la méthode à notre modélisation a fait apparaître trois possibilités, qui ne diffèrent que par le type de couplage effectué avec le système thermique global de la zone :

- La méthode dite couplée, dans laquelle les flux nets calculés sont injectés dans le vecteur de sollicitation [S] du système matriciel de la zone concernée, le couplage ayant lieu de manière itérative sur l'ensemble du champ de température [T]

- La méthode dite découplée, expliquée par Allard basée sur un couplage itératif ne faisant intervenir que les températures de surface intérieures du système matriciel de zone, inspirée des travaux de Allard [Allard, 1986]

- La méthode dite décalée, dans laquelle les flux nets ne sont pas couplés itérativement, mais sont simplement calculés au départ des températures de surface intérieures du pas de temps précédent

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

La première méthode est manifestement la plus fine, mais pose également le plus de contraintes ; de temps calcul d'une part, compte tenu du couplage fin flux/température à réaliser, et d'autre part d'ordre numérique :

La méthode s'apparente en effet à une méthode de point fixe multidimensionnelle, dont la convergence n'est pas toujours possible. En effet, l'algorithme de résolution peut s'écrire de la manière suivante :

$$[T]^0 \text{ donné}$$
$$[T]^{k+1} = \vec{F}([T]^k)$$

Le champ de température initial $[T]^0$ correspond aux températures du pas de temps précédent et les fonctions \vec{F} sont les équations de bilan énergétique de surface intérieure de chaque paroi.

Fortin a confirmé qu'un tel processus est d'une part très sensible aux conditions initiales, le vecteur de départ devant appartenir au bassin d'attraction du point fixe et ne converge que si le point fixe $[T]_{\text{sol}}$ est attractif, ce qui se traduit mathématiquement par un rayon spectral de la matrice jacobienne de $F([T]_{\text{sol}})$ strictement inférieur à 1 [Fortin 2001].

➤ LA METHODE DU COEFFICIENT D'ECHANGE GENERALISE

DEVELOPPEMENT THEORIQUE

Compte tenu des remarques précédentes au sujet des contraintes liées à la méthode des radiosités et afin de rester dans l'optique d'une approche multimodèle, nous nous sommes intéressés à une méthode simplifiée de calcul des transferts radiatifs de grandes longueurs d'onde. Cette dernière est basée sur la notion de température radiante moyenne, que nous allons dans un premier temps rappeler. Nous verrons au cours du développement mathématique qu'il est possible de convenir d'un coefficient d'échange radiatif, permettant en outre de simplifier le formalisme des équations.

Dans un deuxième temps, nous proposerons une extension des notions développées au cas où des parois faiblement émissives sont présentes dans l'enceinte, ce par une généralisation évitant une prise en compte trop pénalisante des relations liées aux inter-réflexions entre les diverses surfaces.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

PRELIMINAIRE : LA NOTION DE TEMPERATURE RADIANTE MOYENNE

Rappelons l'origine de cette notion [Cacavelli 88]:

Soit une enceinte fermée, composée de n_p parois ; on suppose que toutes les parois de cette enceinte sont noires, et connectées radiativement à un corps c , supposé noir, de faible dimensions, en équilibre radiatif. La notion de température radiante moyenne est largement reconnue et permet d'utiliser un formalisme identique pour les transferts thermiques radiatifs de grande longueur d'onde et les transferts convectifs. Elle est liée à la notion de coefficient d'échange radiatif intérieur d'une enceinte, généralement noté h_{ri} , analogue au coefficient d'échange par convection, généralement noté h_{ci} .

Ecrivons le bilan radiatif de ce corps ; par définition, le flux net du corps c vaut :

$$F_{net,c} = F_{emis,c} - F_{abs,c}$$
$$F_{net,c} = S_c \left[\sigma T_{rm}^4 - \sum_{p=1}^{n_p} f_{cp} R_p \right]$$

Miranville [Miranville 2003,2006] a donné la forme la plus adaptée à notre modélisation de la température radiante moyenne et elle est de la forme suivante

$$T_{rm} = \frac{\sum_{p=1}^{n_p} S_p H_{ri,p} T_{i,p}}{\sum_{p=1}^{n_p} S_p H_{ri,p}}$$

LES FACTEURS DE FORME

Les facteurs de forme sont des grandeurs qui permettent de tenir compte de l'interaction radiative plus ou moins importante entre les parois d'une zone. Ils sont liés à sa configuration géométrique qui va conditionner les angles solides à travers lesquels les parois vont se « voir » entre elles. Ainsi, afin de les déterminer de manière précise une description géométrique fine de l'enceinte s'impose.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

De plus, le calcul rigoureux des facteurs de forme fait intervenir des intégrales multiples, dont la résolution mène à des formules analytiques complexes. Ces dernières, dans le cas de géométries irrégulières, ne permettent pas toujours de déterminer les valeurs convenables. Le recours aux techniques numériques est alors privilégié [Hu, 2001].

Il y a plusieurs méthodes pour déterminer les grandeurs de facteur de forme ; parmi elles, la méthode de HOTELL et celle dite simplifier.

Première Méthode « Simple »

Cette méthode fuit une description exhaustive de l'enceinte, qui nécessite en outre un repérage fin des différentes parois, pour cela on adopte des simplifications qui mènent à déterminer des facteurs de forme approchés. Parmi ces simplifications la considération que les facteurs de forme sont donnés au prorata des surfaces de l'enceinte

Supposition :

On considère une enceinte fermée composée de n parois plates, si les surfaces sont notées S_i avec $i = 1$ à n ; le facteur de forme entre deux surfaces est donné par :

$$f_{ip} = \frac{S_p}{S_{tot}} = \frac{S_p}{\sum_{p_1=1}^n S_{p_1}} \text{ et } f_{ii} = 0$$

Cependant, il faut que les facteurs de forme vérifient les deux principes fondamentaux :

1. le principe de réciprocité.
2. le principe de complémentarité ; alors que ce dernier est vérifié contrairement au premier :

$$S_i \cdot f_{ip} = \frac{S_p}{S_{tot}} S_i = \frac{S_i}{S_{tot}} S_p = S_p \cdot f_{pi} \text{ ce qui vérifie la réciprocité}$$

L'expression du facteur de forme, qui vérifie à la fois les principes de complémentarité et de réciprocité [Miranville 2003]:

$$f'_{ip} = f_{ip} + \frac{S_p^2}{\sum_{p'=1}^n S_{p'}^2} \cdot \frac{S_i}{S_{tot}}$$

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

La méthode de Hottel

Le principe énoncé par Hottel constitue la règle des cordes croisées ; en considérant l'enceinte de la Figure 7, supposée infinie selon l'axe Oz, elle s'exprime de la manière suivante [De Vriendt, 1984]:

« Le produit $A_i f_{ij}$ par unité de longueur normale au plan de la figure et relatif à tout couple (i,j) de surfaces dans une enceinte quelconque (mais infinie selon Oz) peut s'obtenir en tendant des cordes entre les extrémités des deux surfaces : le produit est égal à la demi- somme des segments croisés moins la demi- somme des segments non croisés.
»

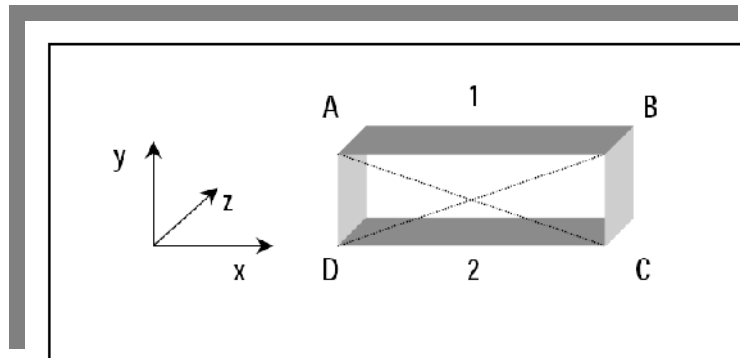


Figure 7 : Illustration de la règle de Hottel

Donc on peut écrire :

$$A_1 \cdot f_{12} = ((AC+BD) / 2) - ((AB+BC) / 2)$$

Nous avons donc un moyen simple pour la détermination des facteurs de forme dans une enceinte. De plus, dans les cas courants, les géométries internes des bâtiments sont simples, ce qui permet l'utilisation de cette méthode.

On peut déterminer de manière précise, les facteurs de forme, en utilisant les formules analytiques ; ces dernières sont toutefois d'expressions complexes et c'est pourquoi elles font l'objet d'abaques.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

Dans le cas de géométries simples qui est le notre, elles sont utilisables directement, sous réserve de disposer des informations géométriques suffisantes.

Les expressions qui ont été utilisées dans notre calcul sont :

- Pour une surface rectangulaire :

$$\left\{ X = \frac{a}{c}; Y = \frac{b}{c}; f_{12} = \frac{1}{\pi \cdot Y} \left[\sqrt{1+Y^2} \cdot \arctan\left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}}\right) - \arctan(X) + \frac{X \cdot Y}{\sqrt{1+Y^2}} \cdot \arctan\left(\frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}}\right) \right] \right.$$

- Surface perpendiculaire à un rectangle

$$\left\{ X = \frac{a}{c}; Y = \frac{c}{b}; f_{12} = \frac{1}{\pi} \left[\arctan\left(\frac{1}{Y}\right) + \frac{Y}{2} \ln\left(\frac{Y^2 \cdot (X^2 + Y^2 + 1)}{(1+Y^2)(X^2 + Y^2)}\right) - \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) \right] \right.$$

Rectangle perpendiculaire :

$$\left\{ \begin{aligned} & \left\{ X = \frac{b}{a}; Y = \frac{c}{a}; f_{12} = \frac{1}{\pi \cdot Y} \left[Y \cdot \arctan(1/Y) + X \cdot \arctan(1/X) - \sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \arctan(1/\sqrt{X^2 + Y^2}) \right] + \right. \\ & \left. 1/4\pi Y \cdot \ln\left(\left[\frac{(1+Y^2)(1+X^2)}{1+X^2+Y^2} \right] \left[\frac{Y^2 + (1+X^2+Y^2)}{(1+Y^2)(Y^2+X^2)} \right]^{Y^2} \left[\frac{X^2(1+X^2+Y^2)}{(1+X^2)(Y^2+X^2)} \right]^{X^2} \right) \right. \end{aligned} \right.$$

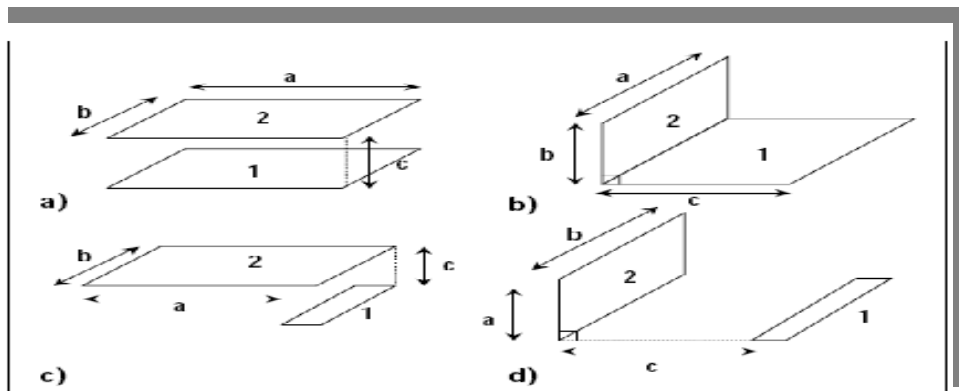


Figure 8 : Configurations de calcul des facteurs de forme

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

L'utilisation de ces formules permet la détermination des facteurs de forme de l'ensemble des parois donnée de géométrie simple.

B- LES TRANSFERTS CONVECTIFS

1. RESENTATION DES CORRELATIONS

Généralement, la résolution d'un problème de convection pour le thermicien du bâtiment se résume à choisir la corrélation adaptée menant au coefficient d'échange convectif h , en fonction de :

- La configuration géométrique à laquelle il s'intéresse,
- Le fluide qu'il considère
- Le type de convection.

Les relations donnent pour la plupart le nombre de Nusselt en fonction de nombres adimensionnels dépendant du type de convection (naturelle ou forcée), mais d'autres types de corrélations existent. En particulier, celles donnant le coefficient d'échange par convection en fonction de l'écart de température air/paroi sont intéressantes. Nous présentons dans la suite les corrélations en convection naturelle que nous avons retenues pour les deux configurations suivantes: le cas des cavités à grand nombre de Rayleigh, typiquement les pièces d'habitation, et celui des cavités confinées telles que les lames d'air.

1- Corrélations retenues pour les cavités à grand nombre de Rayleigh

Awbi confirme que pour de telles configurations, le coefficient d'échange convectif joue un grand rôle et d'importantes erreurs peuvent survenir dans le cas d'une mauvaise estimation [Awbi, 1999].

Plusieurs corrélations sont disponibles dans la littérature, obtenues sur la base de développements théoriques ou d'expérimentations. Pour une revue des principales corrélations proposées, se référer à [Khalifa, 2001] [Moudjaled 2007].

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

De plus, en fonction des équipements (convecteurs, climatiseurs, etc.), les régimes de convection qui peuvent survenir sont nombreux ; Beausoleil- Morrison propose une classification de ces différents régimes en distinguant notamment les forces motrices générant les écoulements. Il propose également un algorithme permettant de prendre en compte la variation de ces régimes de convection lors de simulations numériques [Beausoleil- Morrison, 2001].

De plus, certaines des corrélations issues de la littérature ont été obtenues sur la base d'expérimentations sur des dispositifs dont la géométrie diffère de celle des enceintes de type pièce d'habitation. L'utilisation de telles corrélations pour des simulations du comportement thermique des bâtiments semble alors contestable. Awbi propose alors une série de coefficients d'échanges convectifs, déterminés au départ d'expérimentations dans un local à échelle 1 et prenant en compte les échanges radiatifs.

Les relations issues de ses travaux sont les suivantes :

Pour une paroi verticale [Lauret 2006] :

$$\begin{cases} D = \frac{4S}{P} \\ h_{ci} = \frac{1.823}{D^{0.121}} \cdot (\Delta T)^{0.293} \end{cases}$$

avec

D : diamètre hydraulique, donnée en fonction de la surface de paroi S et de son périmètre P.

ΔT : l'écart de température air / paroi.

Pour le Plancher

$$h_{ci} = (2.175 / D^{0.076}) \cdot (\Delta T)^{0.308}$$

Pour le plafond

$$h_{ci} = 0.704 / D^{0.601} (\Delta T)^{0.133}$$

Nous avons opté pour l'utilisation de ces corrélations pour notre code de modélisation de cavités de type pièces d'habitation.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

2- Corrélations retenues pour les cavités confinées

Et de même pour les enceintes à faible rapport d'allongement, les corrélations données dans la littérature sont nombreuses et dépendent de la configuration considérée. Notre intérêt se portant sur les corrélations permettant le calcul du coefficient d'échange convectif de lames d'air en convection naturelle, nous avons été amenés à considérer dans un premier temps les études de Elsherbiny [Elsherbiny, 1996] [Alain SEMPEY 2008]. En effet, ce dernier propose des corrélations donnant le nombre de Nusselt global dans une lame d'air inclinée en fonction du nombre de Rayleigh et pour des rapports d'allongements (H/L) donnés (cf. Figure 9).

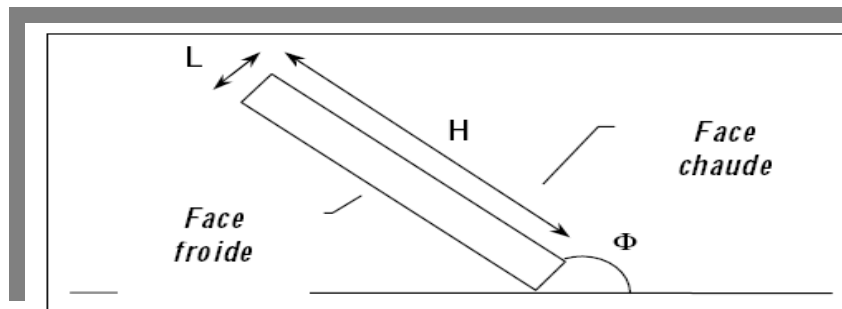


Figure 9 : Lame d'air inclinée, chauffée par le haut

De plus, l'étude menée est expérimentale et traite d'une lame d'air chauffée en face supérieure pour deux rapports d'allongements différents et pour des conditions aux limites parfaitement conductrices. Sur ce dernier point, l'auteur mentionne que la majorité des études publiées considèrent que les extrémités de la lame d'air sont isolées, ce qui rend les résultats non applicables dans certains cas.

Les corrélations obtenues pour un rapport d'allongement $H/L=20$ sont les suivantes :

- $\Phi=180^\circ$ (lame d'air horizontale)

$$Nu = [1 + (0.262 \cdot Ra^{0.136})^{11}]^{1/11}$$

- $\Phi=120^\circ$

$$Nu = [1 + (0.0566 \cdot Ra^{0.332})^{4.76}]^{1/4.76}$$

- $120^\circ \leq \Phi \leq 180^\circ$

$$Nu(\Phi) = Nu(180^\circ) + (180 - \Phi) \cdot (Nu(120^\circ) - Nu(180^\circ))$$

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

La seconde corrélation qui a retenu notre attention est celle d'Arnold [Chapman, 1974]. Celui-ci considère la même configuration qu'Elsherbiny, à l'exception près que les extrémités de la lame d'air ne sont plus parfaitement conductrices, mais adiabatiques. Dans l'optique de pouvoir mettre en évidence l'influence de la prise en compte des conditions aux limites, il nous a semblé opportun d'intégrer également cette corrélation.

Les relations proposées pour $90^\circ \leq \Phi \leq 180^\circ$ sont les suivantes :

$$Nu = 1 + [Nu_{90} - 1] \cdot \sin \Phi$$

où

Nu_{90} est le nombre de Nusselt évalué pour $\Phi = 90^\circ$:

$$Nu = \max \{Nu_1, Nu_2, Nu_3\}$$

$$Nu_1 = 0.0605 \cdot Ra_L^{1/3}$$

$$Nu_2 = \{1 + [0.0104 \cdot Ra_L^{0.293} / 1 + (6310 / Ra_L)^{1.36}]^3\}^{1/3}$$

$$Nu_3 = 0.242 \cdot (Ra_L / A)^{0.272}$$

Ra_L est le nombre de Rayleigh évalué pour la hauteur L et A est le rapport d'allongement (H/L) ; cette corrélation est valable pour les conditions suivantes :

$$5 < A < 110$$

$$10 < Ra_L < 2 \cdot 10^7$$

En plus de ces corrélations, de type adimensionnelles, les relations donnant le coefficient d'échange en fonction de l'écart de température air/paroi pour des plaques planes sont également utilisées. Afin de compléter la variété des relations implémentées, nous avons considéré d'une part la corrélation intégrée au programme HEAT [Fauconnier, 1986] et ensuite celle donnée dans le guide « Ashrae Handbook of Fundamentals », dont les expressions, en fonction de l'écart de température air/paroi et de la longueur des plaques sont les suivantes :

- Corrélation « HEAT », valable pour une paroi horizontale, que le flux soit ascendant ou descendant :

$$h_{ci} = (\Delta T)^{0.425} + 1.7$$

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

- Corrélation « Ashrae », valable pour une plaque plane horizontale chauffée par le haut :

$$h_{ci} = 0.59 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25}$$

Les relations ci-dessus ont été implémentées au code de calcul. Elles permettent ainsi, en fonction du bâtiment simulé, de disposer de modèles de coefficients d'échanges convectifs de degré de finesse variable, du plus simple, coefficient d'échange constant, au plus détaillé, coefficient d'échange donné par des corrélations adimensionnelles.

La sélection de l'un ou l'autre de ces modèles se fait par l'intermédiaire de l'interface de description, mais il est à souligner que les corrélations adimensionnelles nécessitent les détails de la géométrie considérée. D'un point de vue descriptif, l'une des difficultés majeures dans l'implémentation de telles relations est le repérage des frontières des lames d'air par exemple. Une lame d'air étant considérée comme une zone quelconque, il faut être capable d'indiquer au code les parois à considérer pour le calcul des coefficients d'échange à l'aide des corrélations.

CONCLUSION

Ce chapitre expose la démarche théorique que nous avons suivi afin de répondre à notre problématique scientifique.

Celle-ci s'intègre dans une démarche plus générale de compréhension du comportement physique des parois complexes.

Ainsi, nous avons dans un premier temps rappelé la notion de paroi complexe ou plus exactement de paroi à comportement complexe. Une revue des diverses stratégies mises en œuvre afin de modéliser de tels systèmes nous a alors guidé vers le choix de l'élaboration d'un prototype de code de simulation du comportement énergétique des bâtiments, par ailleurs inscrit dans une méthodologie d'équipe destinée à l'implémentation progressive de modèles dans un code de calcul spécifique.

CHAPITRE III : MODELISATION DES PAROIS MULTICOUCHES (COMPLEXE)

Cependant, l'étude fine des parois à comportements complexes nécessitant des modèles dits détaillés, nous nous sommes livrés en premier lieu à des développements spécifiques, dans le but d'étoffer le panel des modèles des transferts radiatifs et convectifs. Cette démarche est en outre commune à l'évolution actuelle des codes de simulation.

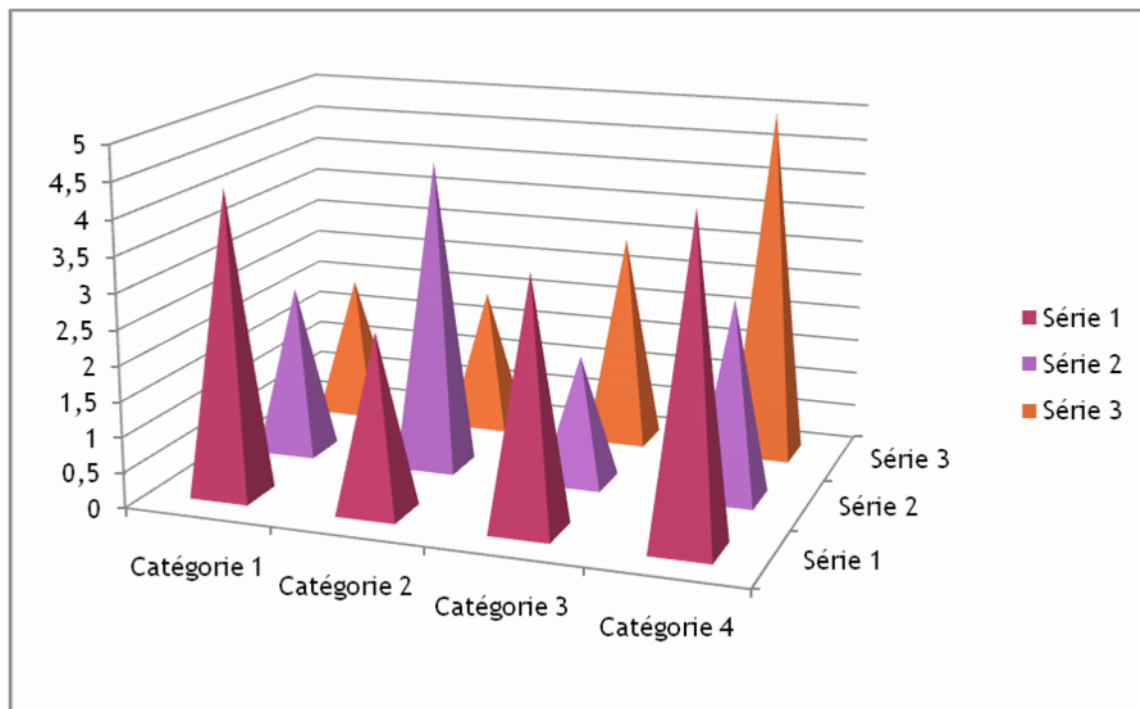
Nous avons ainsi traité dans un premier temps les transferts radiatifs de grande longueur d'onde, en proposant plusieurs approches de la méthode des radiosités. Les contraintes soulevées par cette dernière, d'ordre à la fois numérique et de temps calcul, nous ont amenés à envisager une méthode plus simplifiée, tenant compte en particulier de la faible émissivité dans une enceinte fermée. Le traitement des facteurs de forme a ensuite été intégré au code de calcul, en proposant trois types de relations.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux modèles convectifs, pour lesquels nous avons cherché à diversifier les relations traitant du coefficient d'échange convectif en convection naturelle. Des méthodes de degré de finesse variable ont en conséquence été implémentées, allant du coefficient d'échange constant aux corrélations adimensionnelles.

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

CHAPITRE IV

RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE



CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

I- INTRODUCTION :

La conception thermique des bâtiments est importante et découle de la nécessité de maîtriser l'énergie, afin de préserver les ressources énergétiques. En région méditerranéenne, en particulier en Algérie, cette nécessité se fait sentir d'autant que les moyens de production d'énergie sont limités.

Ceci étant, concevoir une enveloppe pour un bâtiment à basse énergie nécessite la connaissance d'une part des caractéristiques du climat et d'autre part des caractéristiques énergétiques des éléments constitutifs de l'enveloppe.

Bien que de nombreux éléments soient d'ores et déjà répertoriés dans les documents à vocation réglementaire, il existe des situations dans lesquelles les caractéristiques recherchées sont indisponibles. C'est le cas en particulier des PC dont nous avons basé notre modélisation.

Les codes de simulation permettent de retraduire le comportement énergétique d'un bâtiment en fonction de sollicitations données. La démarche menant à ce résultat repose sur une description du bâtiment dans l'environnement du code, ce qui revient à définir un modèle mathématique. Ce dernier fait intervenir plusieurs modèles dits élémentaires (conductifs, convectifs, radiatifs, etc.) et constitue de ce fait un modèle global ; le modèle de bâtiment pouvant être vu comme le couplage d'une combinaison donnée de modèles élémentaires.

Le modèle développé nous permet d'évaluer plusieurs cas en plus il nous donne le temps et nous permet de présenter les conclusions en graphes.

Nous avons utilisé pour la simulation du modèle mathématique développé le langage de programmation Matlab.

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

II- LES RADIATIONS SOLAIRES EN ALGERIE

Nous avons choisis les radiations solaires globales et diffuses données par la station météorologique d'Annaba, les valeurs horaires sont à la base de notre calcul. Les résultats sont donnés en J/m^2 .

Comme il est connu, la course des radiations solaires annuelle et diurne, dépend principalement du facteur astronomique et l'état atmosphérique. Le plus évident est la relation entre l'élévation du soleil et la durée de la journée, les plus grandes valeurs sont observées en été, les plus faibles sont pour les mois d'hiver.

Les brumes et la transparence de l'atmosphère sont les principaux responsables de la dispersion des valeurs diurnes et horaires.

Pour obtenir le total des heures moyennes pour les paramètres des radiations solaires (globales et diffuses) qui représentent la journée moyenne de chaque mois, il faut calculer les moyennes horaires de chaque mois de chaque année concerné par le calcul, sachant que nos calculs s'étendent sur 25ans.

Les résultats pour les radiations globales sont présentés dans la figure 1 et pour les radiations diffuses sont dans la figure 2.

L'échelle des deux figures est différente, pourtant on peut voir que la structure des radiations solaires est caractérisée par une grande partie des radiations diffuses qui contribue à 58% de la moyenne annuelle, et elle est spécialement élevée en période hivernale ; en Décembre elle atteint presque les 65%.

La distribution de l'énergie solaire pendant toute l'année est irrégulière, la période du mois d'Octobre à Avril ne compte que pour 20% des radiations globales annuelle. Le pic des valeurs horaires en été est, à différent moment, plus élevé que celui de l'hiver.

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Dans le but de concevoir des bâtiments modernes à basse énergie, il est nécessaire de calculer des radiations solaires des surfaces avec différentes inclinaison et orientation.

Les sommes des heures moyennes des radiations solaires globales et diffuses sont utilisées dans les données d'entrée à la simulation de la disponibilité des radiations solaires de surfaces variées.

Ces résultats sont explorés pour montrer l'effet de l'inclinaison et de l'angle de l'azimut sur l'énergie reçus par une surface sur une base horaire, journalière, mensuelle, saisonnière et annuelle.

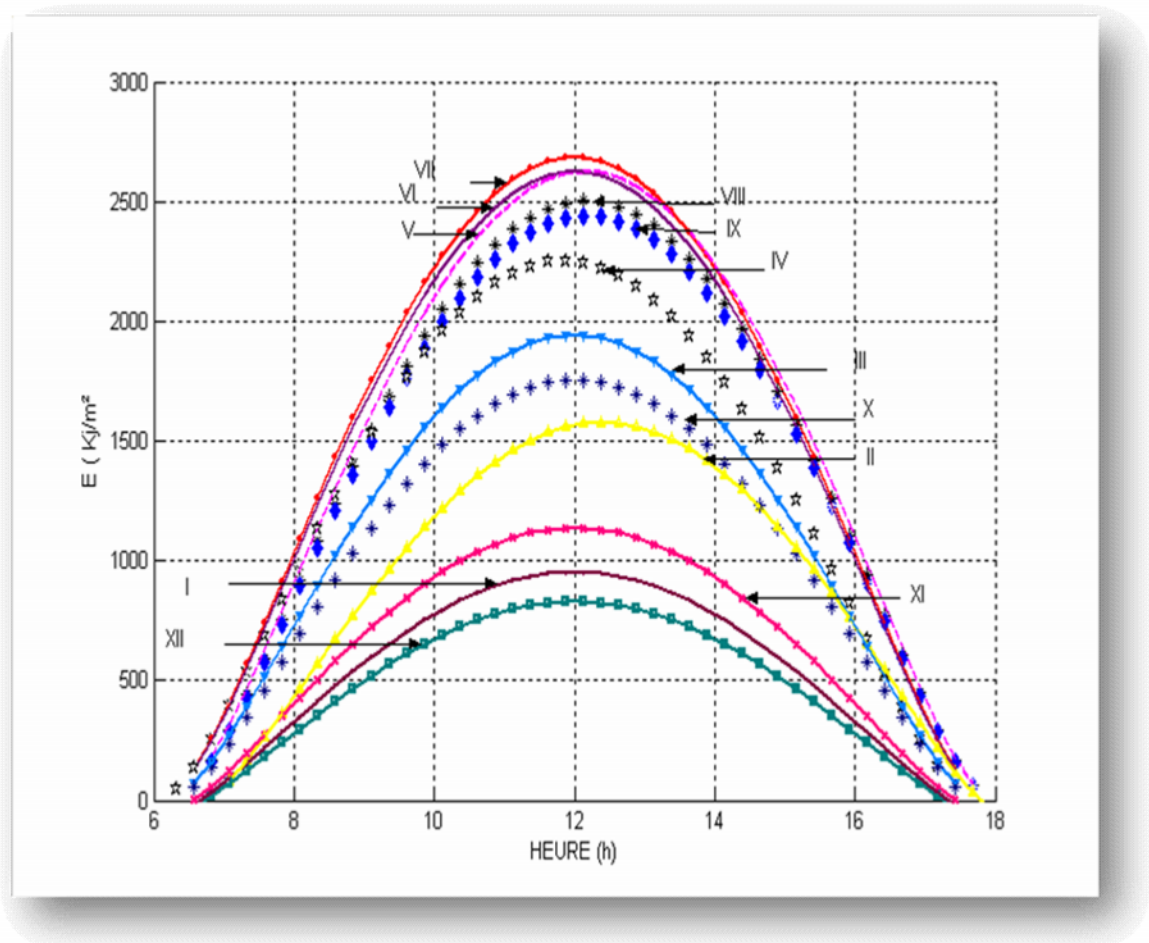


Figure1 : Distribution des moyennes horaires des radiations solaires globales pour tout les mois de l'année à TLEMEN

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

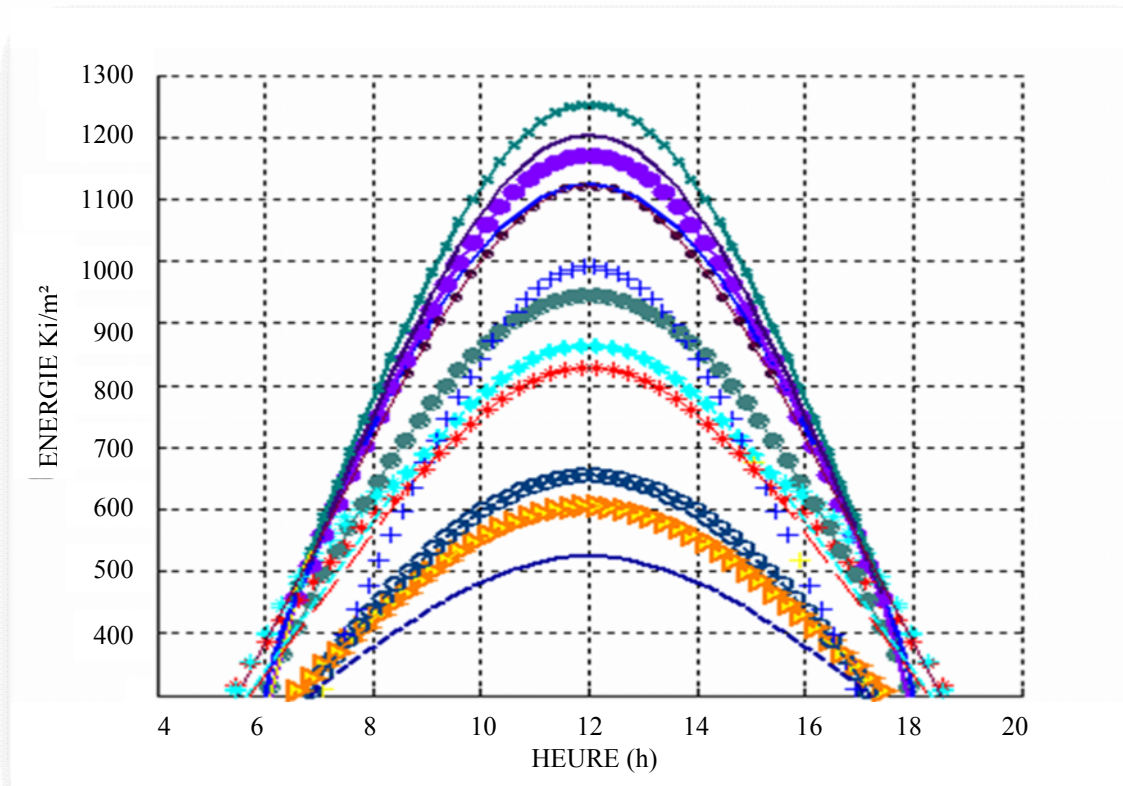


Figure 2 : Distribution des moyennes horaires des radiations solaires diffuses pour tout les mois de l'année à TLEMCEM

III- ESTIMATION DES RADIATIONS SOLAIRES POUR DES SURFACES AVEC DIFFERENTE INCLINATION ET ORIENTATION

Notre principal objectif dans cette partie est de développer un ensemble des sommes d'heures moyennes des radiations solaires pour des jours moyens pour les mois d'une année et ça pour des surfaces avec différents inclinaisons et angles d'azimut, sous formes de diagramme et de tableaux et donner des recommandations sur les orientations et les inclinaisons des élément des bâtiments sous les radiations solaires ; pour les architectes et les concepteurs des systèmes solaires passives où actives de notre pays.

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Avoir un ensemble de données des radiations pour différentes surfaces, pour différente période temporelle ; nous donnons aux architectes le pouvoir de décider de l'inclinaison et de l'orientation des éléments de l'enveloppe des bâtiments, y compris les systèmes thermique.

Ils peuvent concevoir la taille et les éléments de l'enveloppe intégrant des collecteurs solaire où des panneaux pv (photovoltaïques), pour gagner de l'énergie solaire quand il est possible et nécessaire, aussi introduire des dispositifs d'ombrage, qui peuvent constituer une part du building (exp casquettes) où bien faire partie d'un entourage naturel (arbres).

L'architecture d'un bâtiment est cruciale pour déterminer le bilan énergétique et thermique, et le confort intérieur

Pour désigner l'orientation et l'inclinaison des murs et du toit de la maison, pour satisfaire les besoins énergétiques des changements saisonniers c'est souvent une tâche très difficile.

En Algérie pendant l'été les murs et les toits exposés aux radiations solaires incidents ont besoins des systèmes d'ombrage, de l'autre côté en hiver durant la période de froid, la demande de chaleur pour les espaces à chauffer est très élevés, et l'enveloppe des bâtiments devrait être conçus d'une manière à assurer la réception du maximum de radiations solaires incidents.

1- Application du modèle dans la simulation numérique

Les données climatiques de la ville considérée, dans notre cas Tlemcen (Algérie), sont incluses dans le programme. Il est possible de changer les matériaux de construction (leurs paramètres), les épaisseurs, la composition des fenêtres vitrées ainsi les dimensions de leurs cadres les matériaux utilisés et leurs propriétés aussi bien que l'inclinaison et l'orientation (azimuth angles)

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Pour l'élaboration et l'adoption du modèle représentatif des radiations solaires 12 jours moyens (un pour chaque mois de l'année) sont simulés avec différent pas de temps pour différent éléments de l'enveloppe de la maison, chaque jour est répété pour un temps suffisant dans le but d'assurer une bonne solution.

Les quatre orientations principales de la maison le sud, l'est, l'ouest et le nord ainsi que les deux inclinaisons principales qui sont 90° et 45° sont considérées.

La deuxième inclinaison est prise en compte pour considérer des greniers avec des surfaces de murs extérieurs inclinés (Plafond)

La surface extérieure considérée d'une chambre est égale à 10 m² (y compris la taille des fenêtres (1 * 1 m² ou 2 * 2 m²). Toutes les chambres modélisées ont le même volume.

Quelques paramètres caractérisant les murs et les fenêtres pris pour la simulation sont montrés dans le tableau 1 :

Composants du bâtiment	L'épaisseur	Chaleur spécifique	Conduction de la chaleur	Emissivité des radiations thermiques
Le mur extérieur	0.45 (m)			
La couche extérieure	0.10 (m)	840 (J/kg K)	0.78 (W/m K)	0.92
La couche intérieure	0.15 (m)	840 (J/kg K)	0.038 (W/m K)	/
La couche moyenne	0.15 (m)	800 (J/kg K)	0.7 (W/m K)	0.5
La fenêtre				
Lame d'air	0.012 (m)	1005 (J/kg K)	0.033 (W/m K)	
La vitre	0.08 (m)	840 (J/kg K)	0.78 (W/m K)	0.84

Tableau 1 : Quelques caractéristiques des éléments principaux de l'enveloppe du bâtiment

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

1- Résultat de la simulation

Les résultats de la simulation pour un an complet sont présentés sous formes graphiques indiquant les changements énergétiques pour chaque heure de la journée et les variations des radiations solaires au même temps.

Les résultats des variations énergétiques sont montrés pour les quatre principales orientations et les deux inclinaisons mentionnés précédemment, et les radiations solaires sont présentées pour les mêmes orientations et inclinaisons.

Les résultats sélectionnés de la simulation faite sont présentés dans les figures suivantes de 3 à 18.

Les figures 3, 4, 5, 6 et 11, 12, 13, 14 montres les radiations solaires pour une surface verticale et inclinée pour les quatre orientations principales respectivement.

Les figures 7, 8, 9, 10 et 15, 16, 17, 18 présentent les changements énergétiques de la chambre par heure dans un jour type pour chaque mois de l'année pour la même inclinaison et orientation.

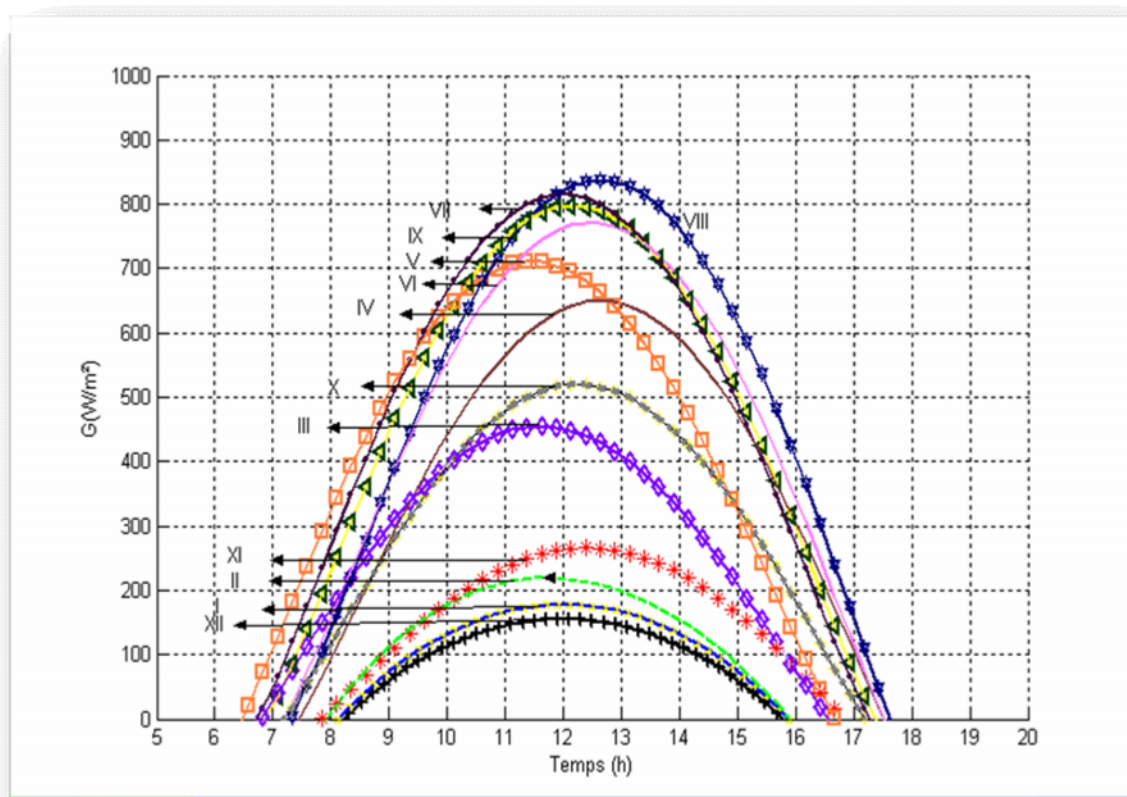


Figure 3 : Les radiations solaires incidentes sur une surface verticale orientée vers le sud

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

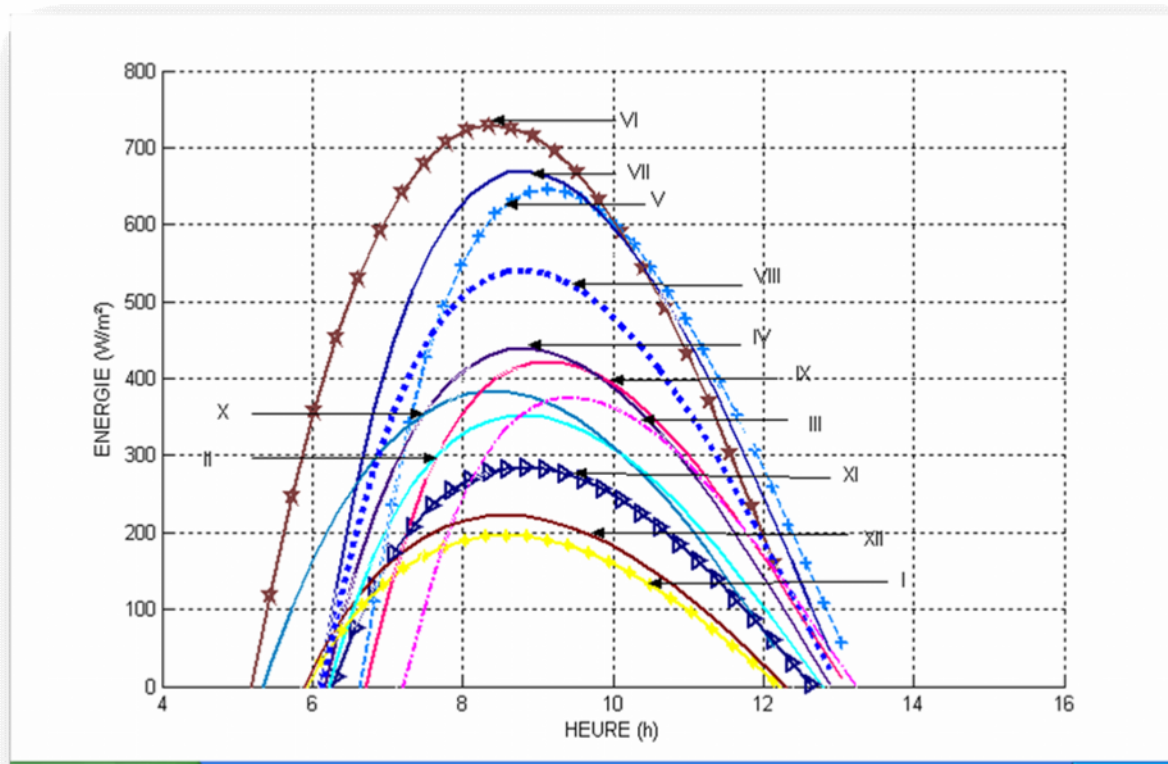


Figure 4 : Les radiations solaires incidentes sur une surface verticale orientée vers l'est

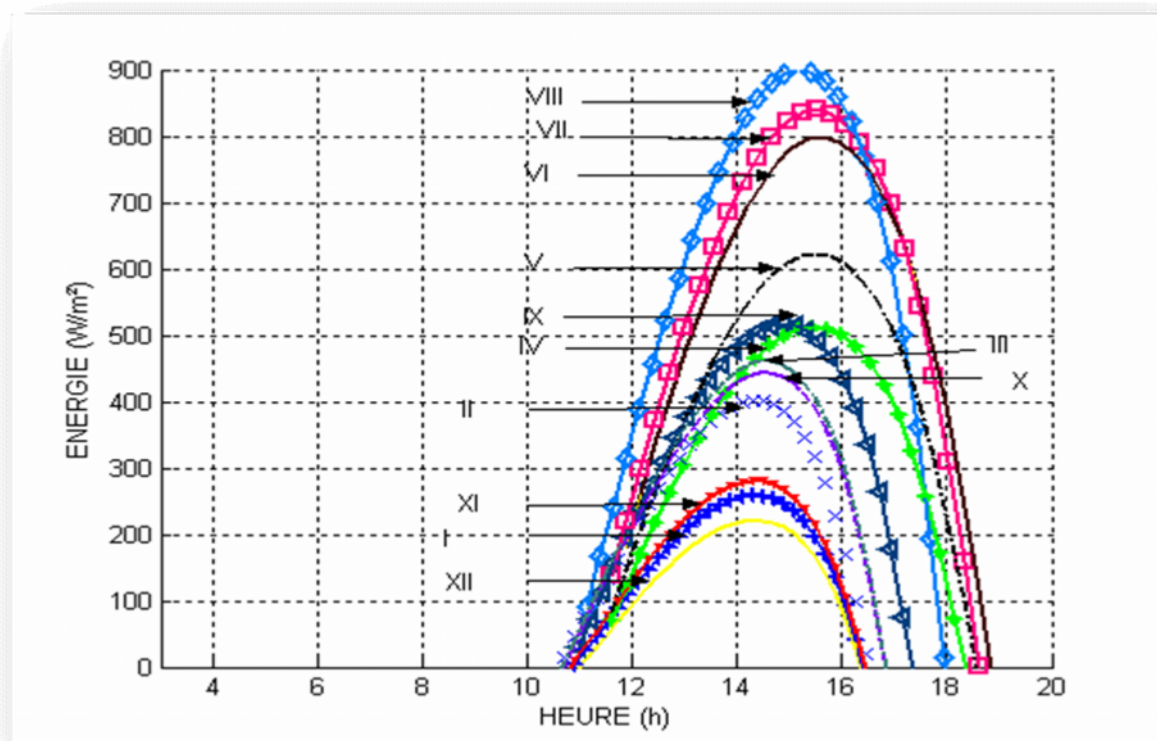


Figure 5 : Les radiations solaires incidentes sur une surface verticale orientée vers l'ouest

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

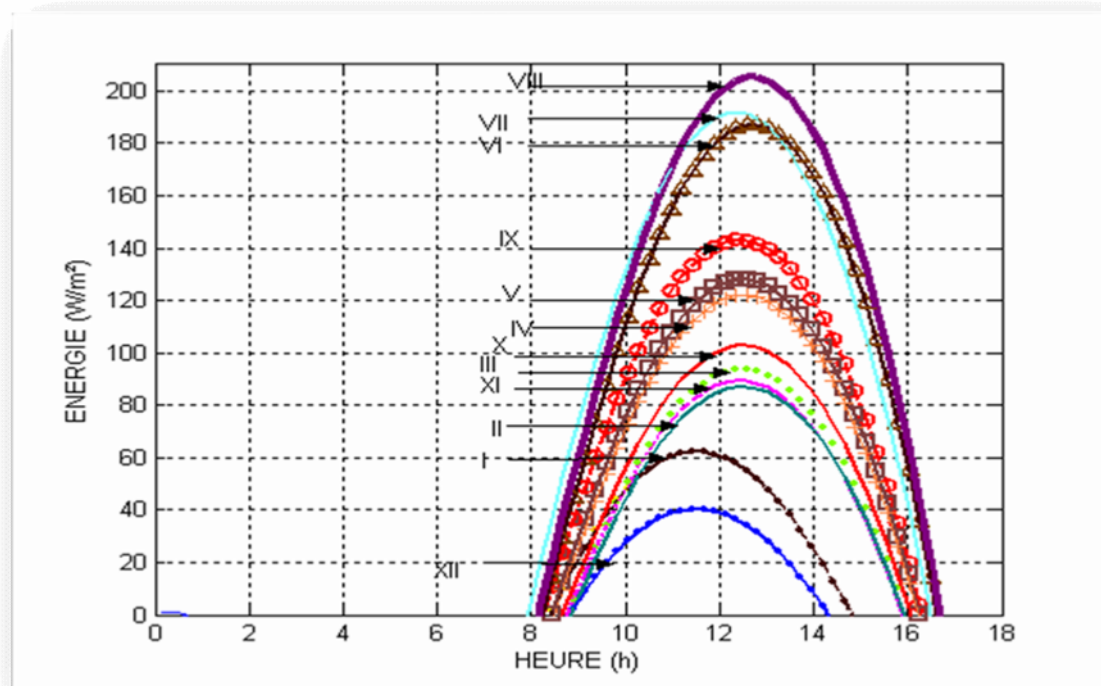
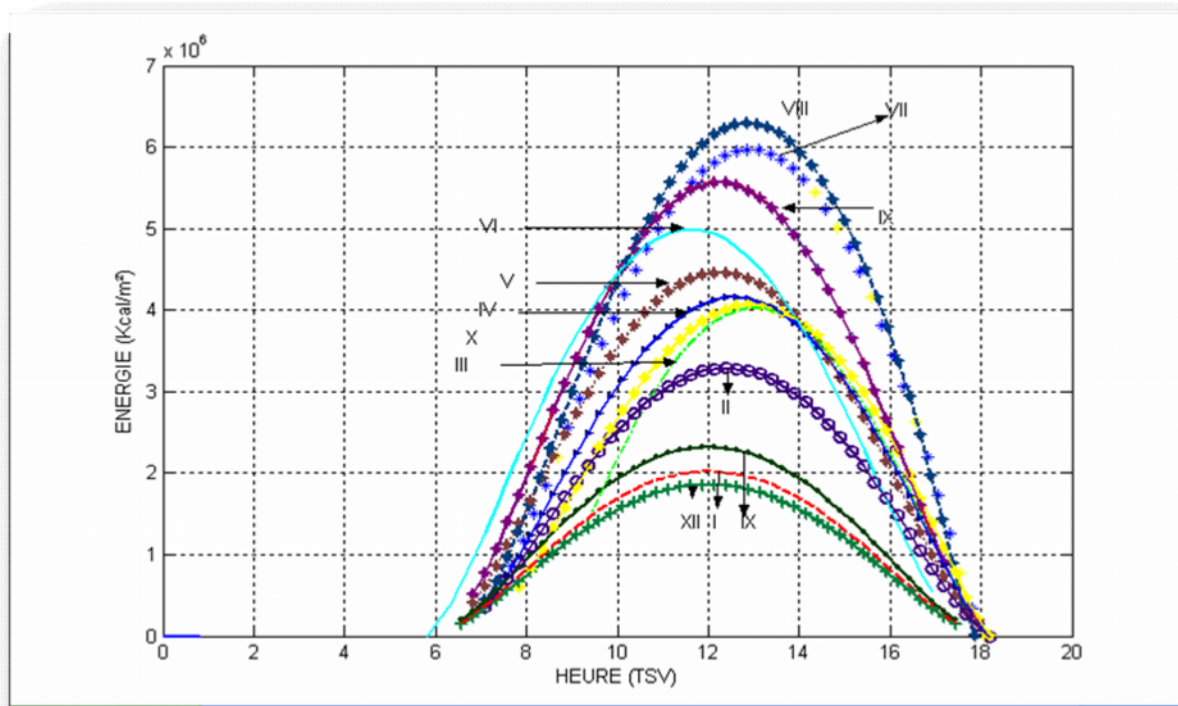
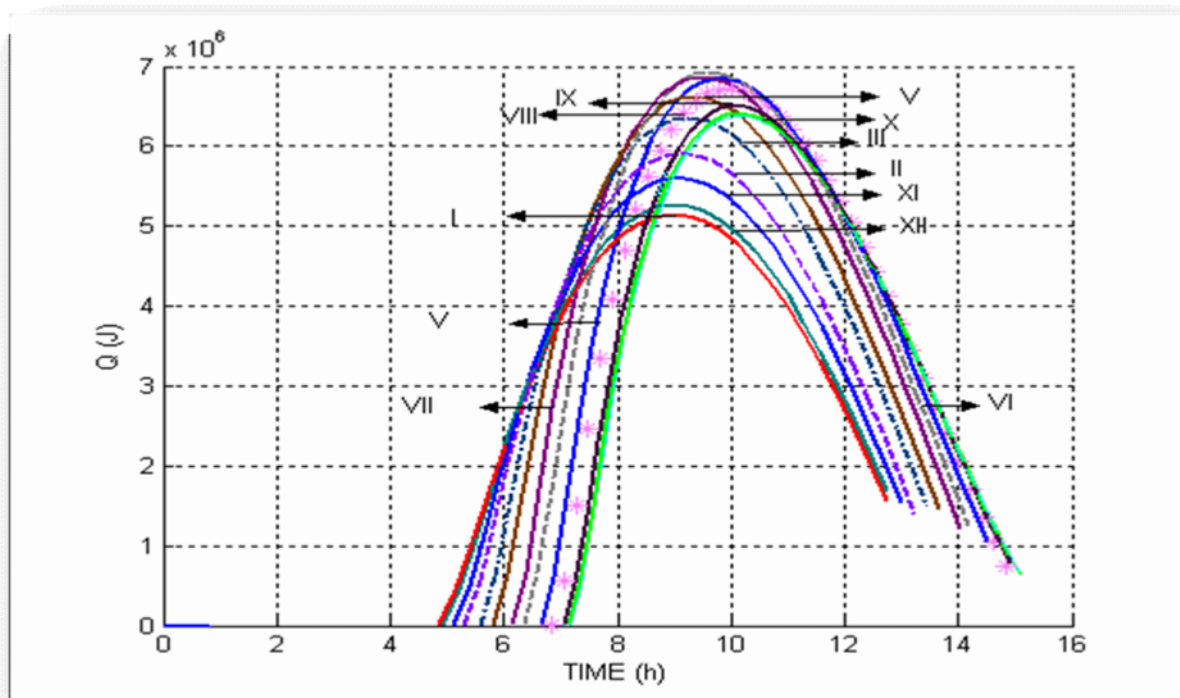


Figure 6 : Les radiations solaires incidentes sur une surface verticale orientée vers le nord

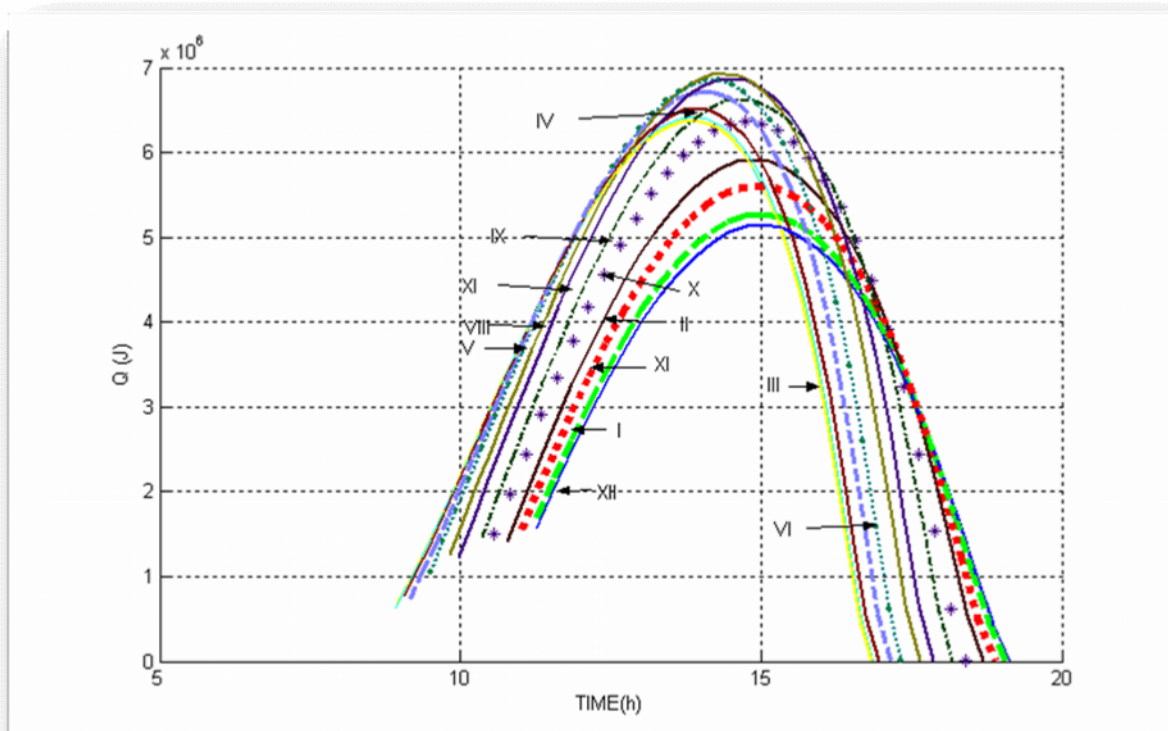


*Figure 7 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface verticale et fenêtre 2*2 m² orientation sud*

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE



*Figure 8 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface verticale et fenêtre 2*2 m² orientation est*



*Figure 9 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface verticale et fenêtre 2*2 m² orientation ouest*

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

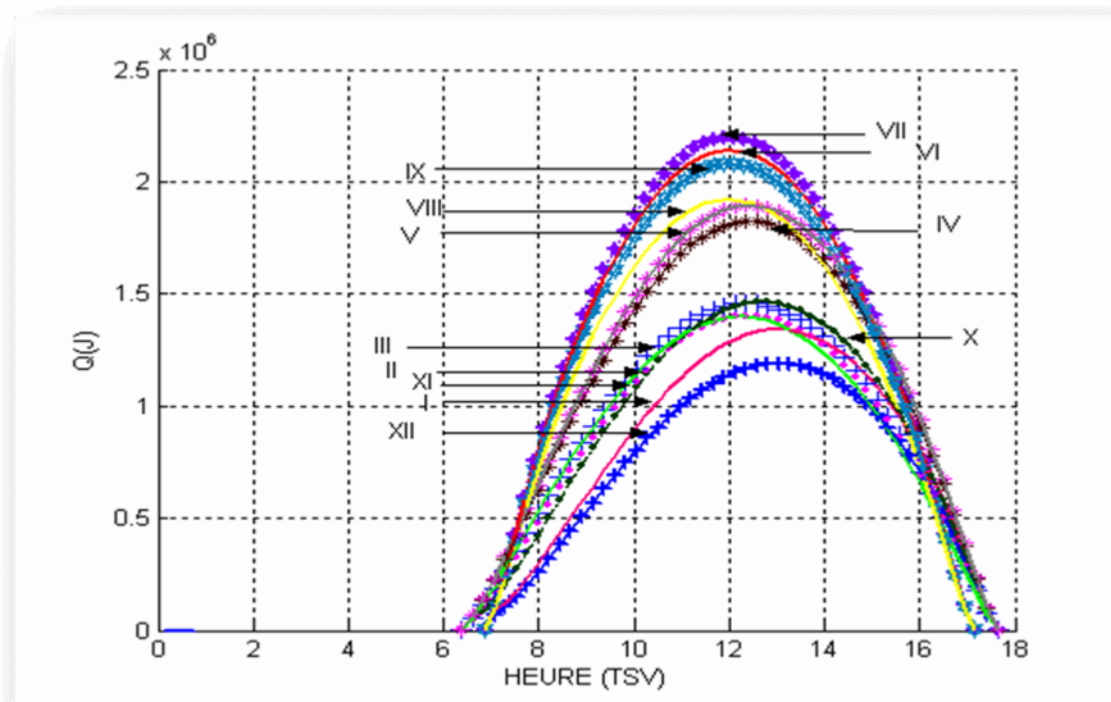


Figure 10 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface verticale et fenêtre $2*2 \text{ m}^2$ orientation nord

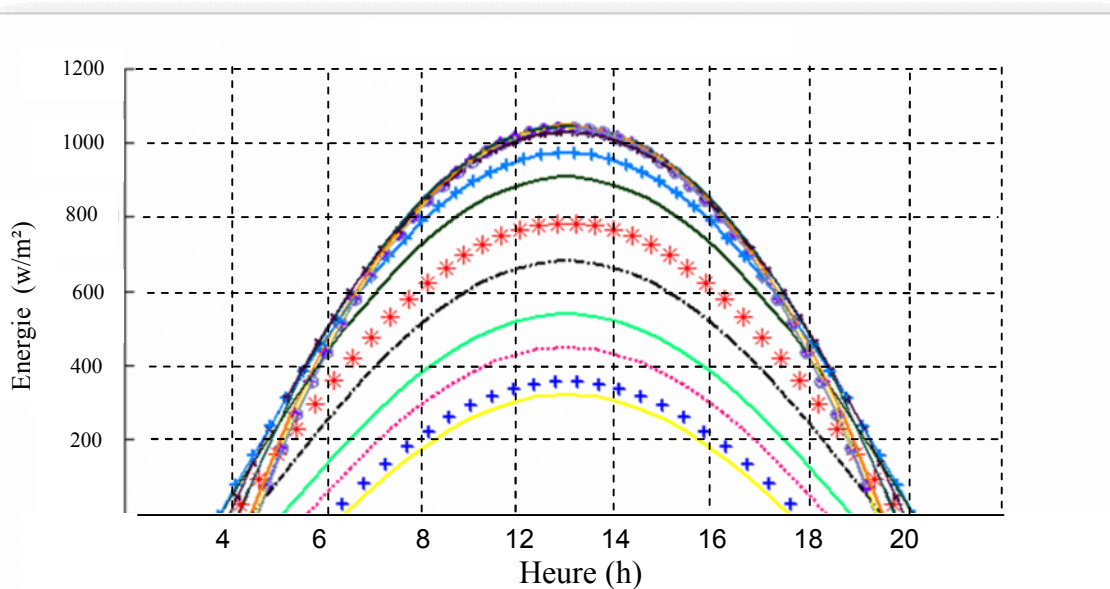


Figure 11 : Les radiations solaires incidentes sur une surface inclinée (45°) orientée vers le sud

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

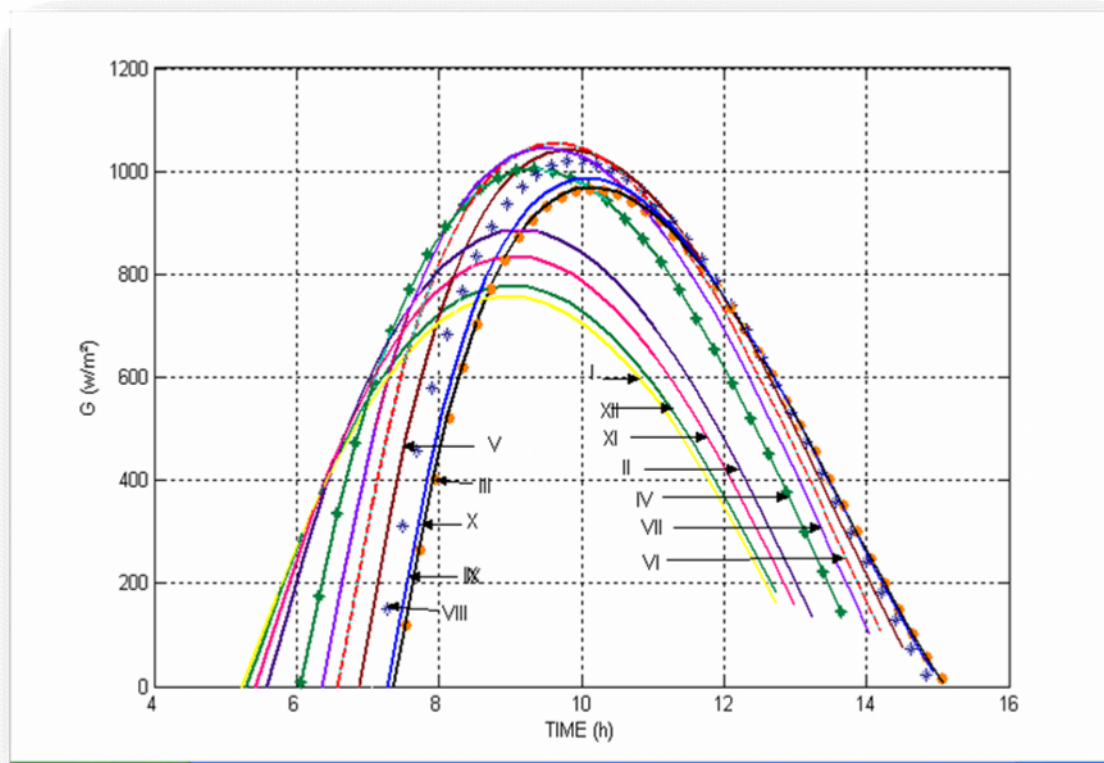


Figure 12 : Les radiations solaires incidentes sur une surface inclinée (45°) orientée vers l'est

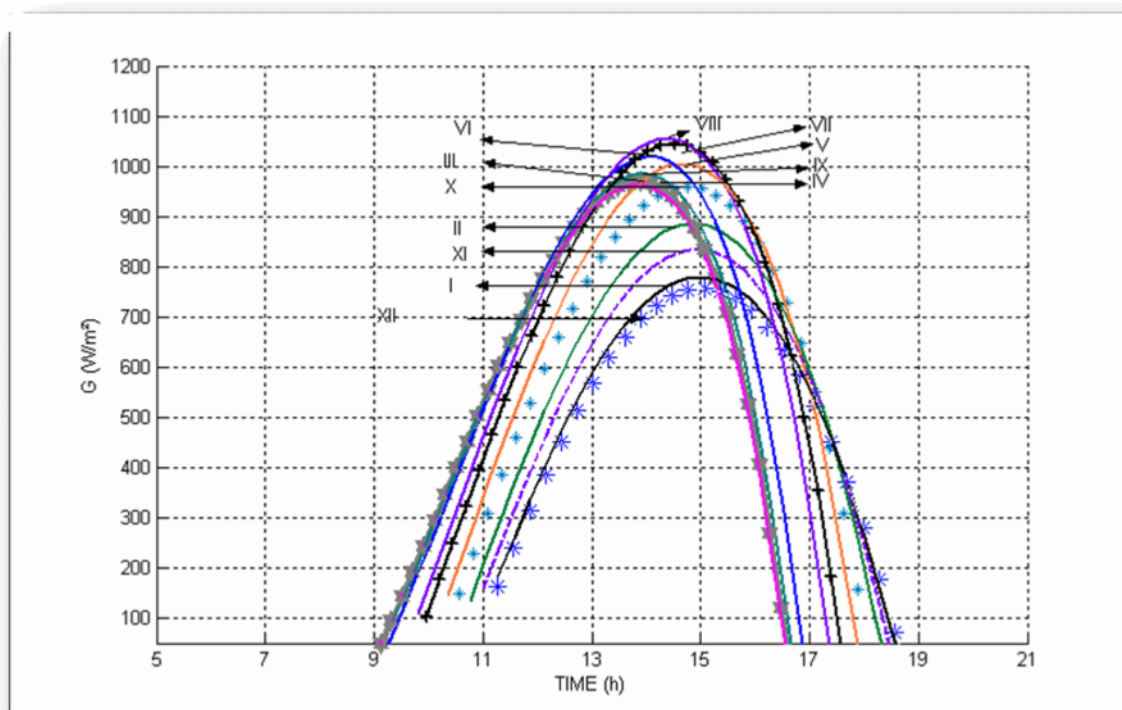


Figure 13 : Les radiations solaires incidentes sur une surface inclinée (45°) orientée vers l'ouest

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

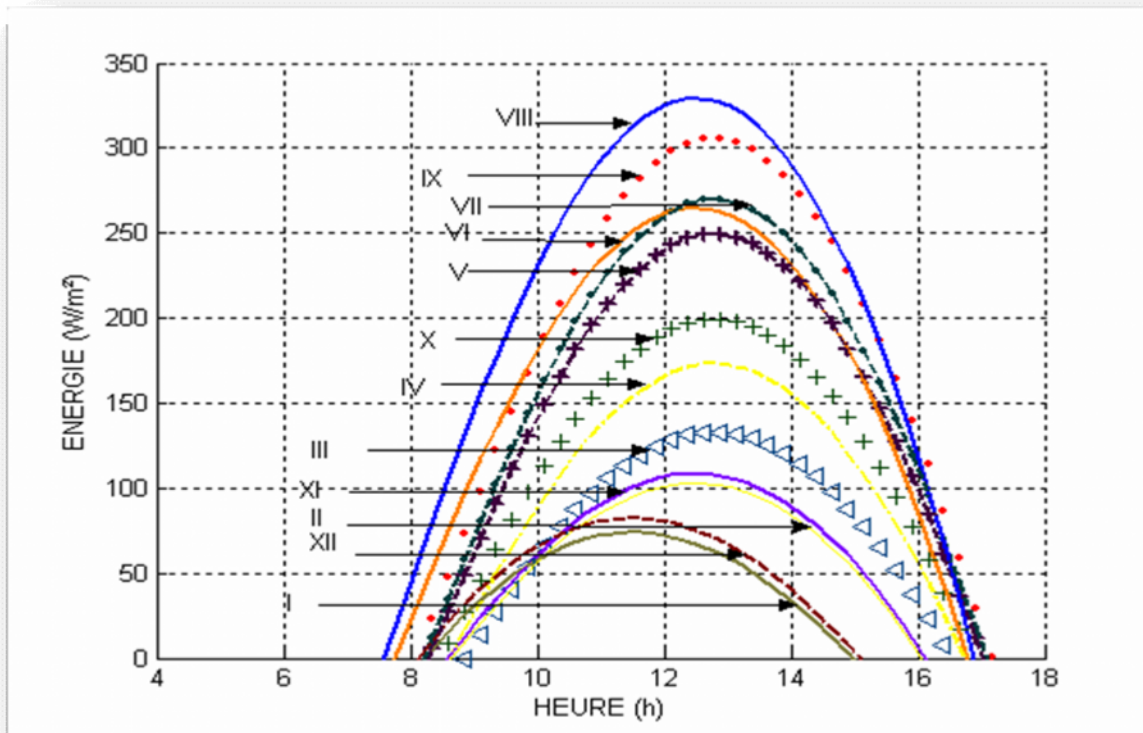
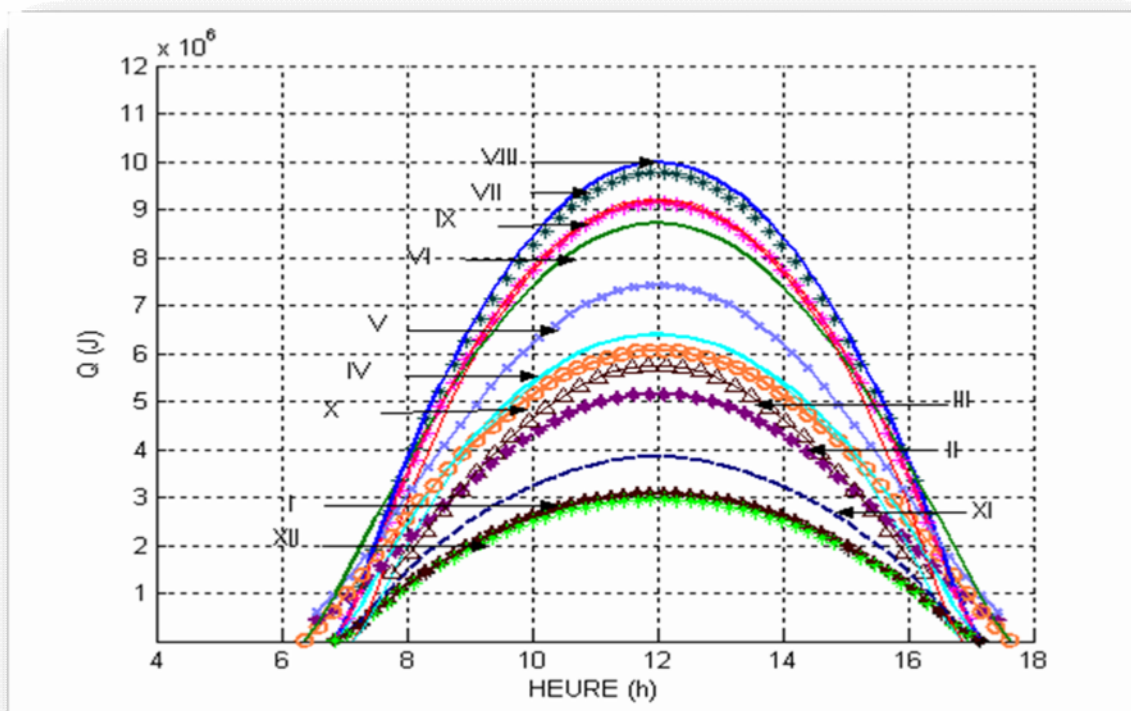
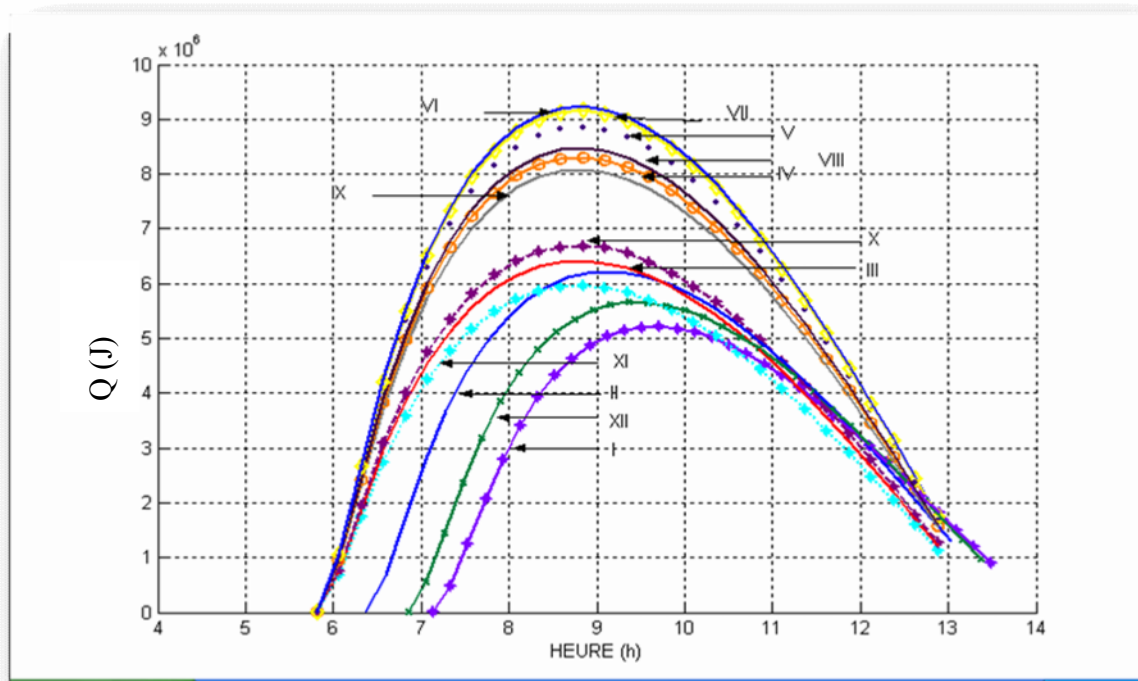


Figure 14 : Les radiations solaires incidentes sur une surface inclinée (45°) orientée vers le Nord

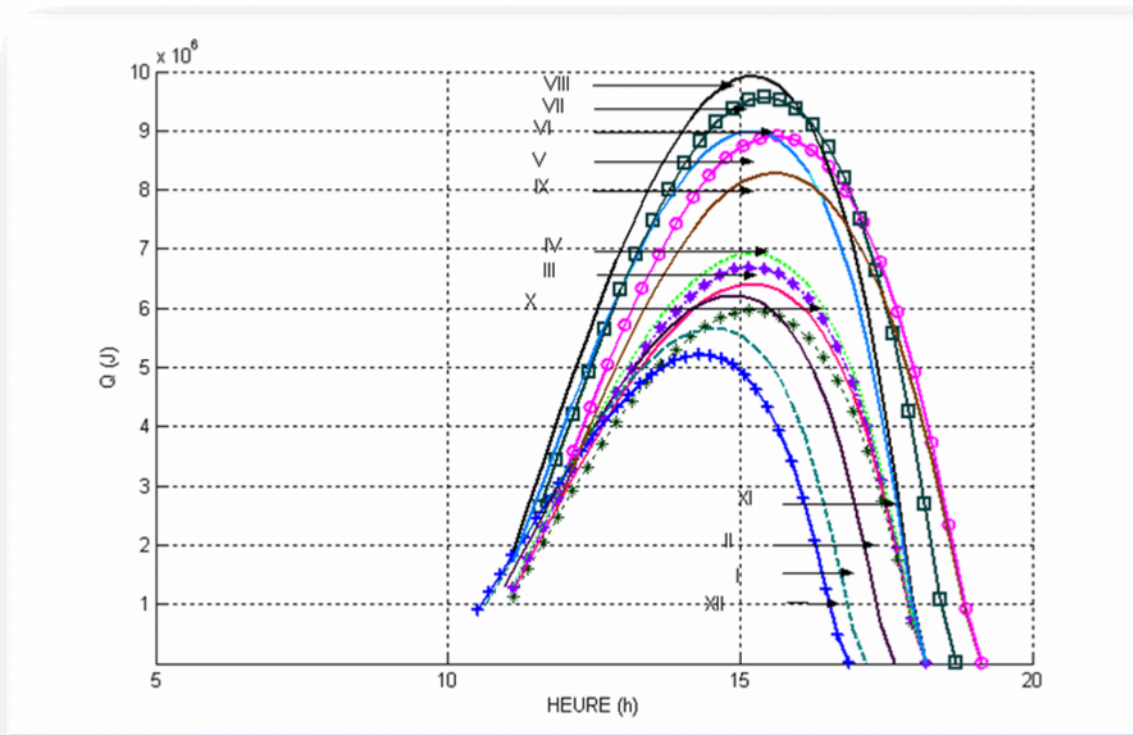


*Figure 15 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface inclinée (45°) et fenêtre 2*2 m² orientation sud*

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

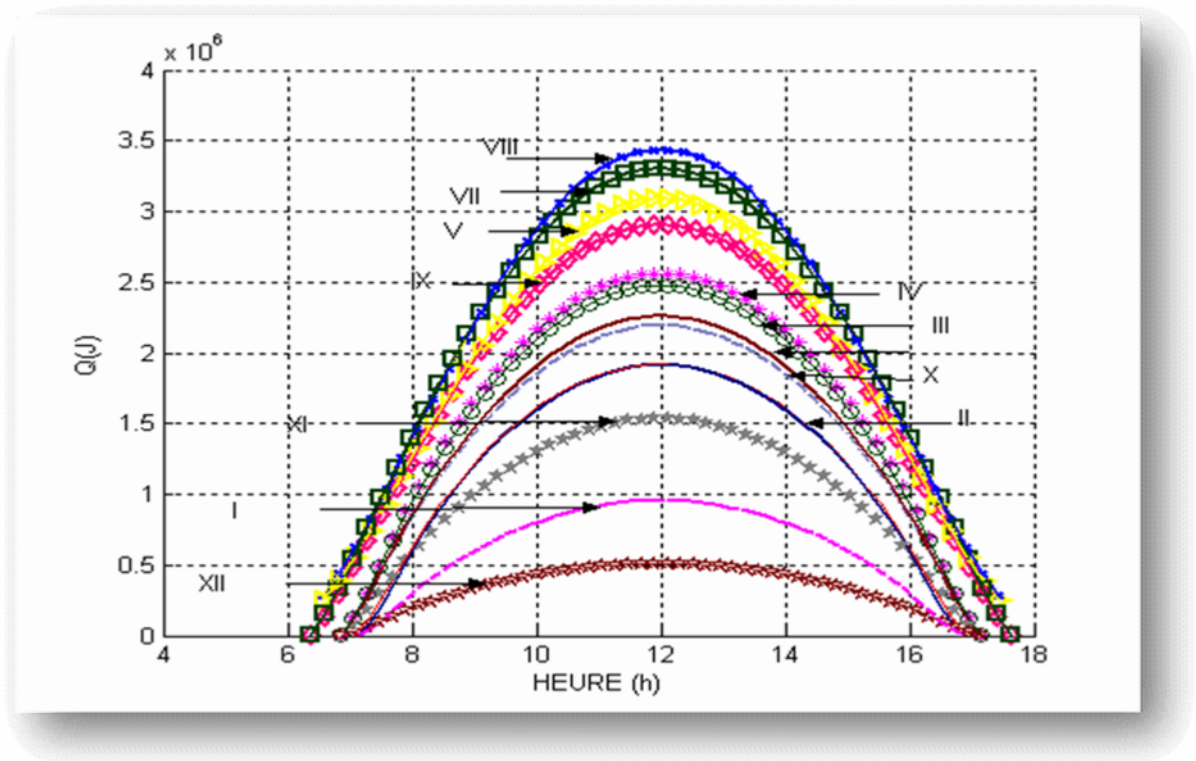


*Figure 16 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface inclinée (45°) et fenêtre 2*2 m² orientation est*



*Figure 17 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface inclinée (45°) et fenêtre 2*2 m² orientation ouest*

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE



*Figure 18 : Changement énergétique journalier pour des chambres avec surface inclinée (45°) et fenêtre 2*2 m² orientation nord*

1- Discussion

Les résultats montrent que l'énergie solaire a une très grande influence sur la distribution journalière de l'énergie demandée dans les cas considérés.

Les distributions de la demande énergétique journalière pour le chauffage et le refroidissement pour les mois d'une année par chaque heure de la journée pour une chambre avec une orientation et une inclinaison sous considération sont très similaires aux distributions des radiations solaires journalières des surfaces de même orientations et inclinaisons à chaque heure de la journée (figures de 3 à 10 pour un mur vertical et de 11 à 18 pour mur incliné - chambre du grenier).

Quand la surface de l'enveloppe de la maison est exposée au soleil et les radiations solaires sont élevées, à ce moment, en été, la demande de refroidissement

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

est la plus élevées (sont au maximum) et en hiver la période de chauffage demandée est plus faible que celle du reste de la journée.

Quand le pic des radiations solaires apparaît dans la matinée de l'orientation est, à midi pour le sud et à l'après midi pour l'ouest au même temps, on peut voir le pic caractérisant la demande de refroidissement en été et la réduction de la demande de chauffage en hiver.

En été, la surface de la façade verticale nord, quand elle est exposée au soleil dès fois le matin et des fois l'après midi, alors le pic de la demande de refroidissement existe à ces moments.

Par contre il est très petit, le matin, à cause des radiations matinales qui sont très faibles, et assez fort et évident dans l'après midi, quand les radiations sont relativement élevés, ce qui est typique pour les conditions climatiques considérés (à Tlemcen les radiations solaires sont plus fortes l'après midi que la matinée ce qui est évident l'été)

En hiver, les radiations solaires des espaces considérés orientés vers le sud cause un flux énergétique solaire très fort dans les chambres, qui affecte le climat intérieur et comme résultat, nous n'aurons pas besoin de période de chauffage pendant quelques heures (différente pour des mois différents) de la journée.

Nous pourrons aussi voir cet effet dans la façade ouest des chambres pour quelques heurs par jour de Janvier, de Novembre et plus long en Février mais cette effet n'existe pas pour les façades est des chambres avec des murs verticaux, et aussi pour celles des façades nord.

L'inclination des surfaces de l'enveloppe du bâtiment (chambres des greniers) connaît une bonne disponibilité de l'énergie solaire par rapport aux autres, et comme résultat, le gain de chaleur de l'énergie solaire dans ces chambres est plus fort et ça encore en Novembre et Février, les chambres de l'est n'ont pas besoin (ne demande pas) de périodes de chauffage pour quelques heures de la journée.

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Les radiations solaires les plus élevées sont des chambres du grenier (là les surfaces sont inclinées à 45°) comparés au chambres avec des murs verticaux ce qui cause un impacte énergétique très important sur le bilan énergétique et comme conséquence nous aurons une demande de refroidissement plus élevés.

En analysant les figures de 7 à 10 et de 15 à 18 pour les chambres avec des murs verticaux et inclinées respectivement, il est évident que pour les façades inclinées « la demande énergétique change d'une manière plus douce ».

Ça est du à un long accès aux radiations solaires directes et diffuses pendant les heures ensoleillés, ce qui est évident en été (les radiations solaires sont fortes). Cependant la différence entre le maximum de l'énergie demandée pour le chauffage et le refroidissement, pour les jours représentatifs de chaque mois de l'année, est plus grande pour les chambres de façades inclinées. Ces chambres là sont plus sensibles au changement des conditions climatiques.

Les radiations solaires pendant la journée ont une grande influence sur la balance énergétique. Dans la nuit ; on a de grande perte d'énergie à cause du transfert convective (causé par la baisse de la température ambiante et le vent) et les transferts radiatifs surtout avec l'hémisphère du ciel (le refroidissement nocturne est plus signifiant pour les surfaces inclinés que verticales).

La grande demande de chauffage et de refroidissement à minuit et à midi (approximativement) veut dire que la capacité des systèmes HVAC (heating ventilation and air conditioning) installés pour les chambres aux murs inclinés (celles du grenier) doit être plus grandes que celles des chambres entourées de murs extérieurs verticaux, et en conséquence la consommation de l'énergie est plus grandes pour les chambres aux mur extérieurs inclinés.

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Pour accentuer l'impact de l'énergie solaire des fenêtres le tableau suivant présente de résultats de simulations faites d'une forme quantitative. Bien entendue, ces résultats sont calculés à partir des paramètres de la conception adoptée des fenêtres, murs et chambres.

Même s'ils ne sont pas strictement représentatifs ils nous donnent une image quantitative des principales parties de la balance énergétique des surfaces considérées (chambres) et souligne le rôle de la fenêtre et en conséquent les radiations solaires dans la balance énergétique d'une chambre.

Le tableau 2 montre la demande énergétique mensuelle du chauffage et refroidissement ainsi le transfert énergétique mensuel à travers une fenêtre d'une chambre considérée avec des murs extérieurs et des ouvertures pour les quatre orientations principales et les deux inclinaisons.

Deux tailles différentes de fenêtres sont considérées une petite (de 1*1 m) et une plus grande (2*2m²). Il est impératif de mentionner que les données présentées dans le tableau donnent une image claire mais assez simple de la demande énergétique mensuelle de la chambre considérée.

Cette simplicité est issue de la méthode de présentation (calcul) des données de la demande énergétique pour ce tableau en sommant des valeurs positives (day time gains) et d'autres négatives (night time losses).

***Tableau 2** : Les besoins énergétiques de la climatisation (chauffage et refroidissement) mensuels et les transferts énergétiques à travers les petites ouvertures différentes inclinaisons et orientations*

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

<i>inclinaison : 90° ; orientation : 0°, -90°, 90°, 180° respectueusement ; dimension fenêtre : 1*1m²</i>												
Mj	<i>Jan</i>	<i>Fév</i>	<i>Mar</i>	<i>Avr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Août</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Déc</i>
E c/r	-357.34	-242.31	-161.31	-9.82	111.20	171.09	192.12	189.02	93.45	-53.01	-221.61	-332.64
Efen	-92.81	-23.51	41.70	102.69	163.50	171.24	188.15	198.13	144.84	71.66	-37.08	-100.03
E c/r	-395.31	-318.16	-235.81	-63.17	89.50	152.81	179.91	133.36	-0.63	-143.18	-263.45	-331.41
Efen	-127.81	-87.46	-32.70	62.95	142.73	171.82	171.67	141.81	69.71	-9.11	-75.92	-115.24
E c/r	-384.31	-296.46	-219.83	-43.2	115.99	189.34	224.18	187.76	30.81	-131.32	-259.19	-341.88
Efen	-117.98	-69.61	-11.51	79.6	153.68	195.72	214.61	191.28	91.24	-6.49	-68.34	-112.01
E c/r	-400.31	-271.21	-267.39	-120.89	12.14	97.23	119.63	69.07	-40.16	-170.67	-276.11	-353.15
Efen	-132.06	-100.32	-59.51	+1.51	81.51	116.72	124.51	96.13	27.70	-32.71	-82.13	-117.61

<i>inclinaison : 90° ; orientation : 0°, -90°, 90°, 180° respectueusement ; dimension fenêtre : 2*2m</i>												
Mj	<i>Jan</i>	<i>Fév</i>	<i>Mar</i>	<i>Avr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Août</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	Déc
E	-626.30	-269.21	18.91	380.70	653.19	721.59	799.66	831.31	568.81	198.55	-327.32	-628.00
c/r	-393.71	-61.67	199.89	478.61	699.01	716.68	793.23	836.5	616.62	301.61	-143.13	-419.99
Efen												
E	-783.30	-581.21	-331.23	192.50	558.91	715.23	744.91	590.70	233.23	-167.76	-500.19	-702.64
c/r	-393.71	-366.07	-146.17	275.01	612.07	722.15	743.72	600.10	289.19	-54.91	-333.21	-506.68
Efen												
E	-739.29	-494.51	-223.21	236.92	663.42	832.19	922.11	810.01	322.10	-117.81	-481.64	-681.31
c/r	-505.18	-283.37	-40.27	341.81	712.88	861.20	919.21	815.00	376.91	-9.78	-316.35	-481.51
Efen												
E c/r	-803.84	-631.6	-461.41	-82.13	263.01	462.31	502.35	341.08	39.88	-267.56	-541.31	-613.70
Efen	-568.04	-428.20	-277.39	33.81	314.90	481.02	507.56	362.77	97.37	-159.25	-361.02	-502.36

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

inclinaison :45° ; orientation : 0°, -90°, 90°, 180° respectueusement ; dimension fenêtre : 1*1m												
Mj	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
E c/r	-367.52	-247.1	-140.09	58.28	233.60	283.25	319.25	290.85	132.41	-50.81	-226.87	-338.14
Efen	-99.1	-19.81	61.23	172.36	270.96	281.32	297.57	283.15	182.12	-57.00	-39.42	-111.11
E c/r	-410.24	-314.31	-223.65	-13.45	165.22	239.36	258.04	192.85	39.78	-131.84	-262.74	-355.21
Efen	-130.41	-82.07	-11.45	109.08	212.79	244.23	246.33	199.65	102.14	-2.15	-72.56	-116.24
E c/r	-390.25	-291.38	-195.14	-1.31	195.25	268.14	301.08	249.25	62.14	-118.32	-258.74	-350.04
Efen	-120.37	-60.85	13.85	116.27	238.14	237.19	291.47	241.01	120.00	17.09	-69.25	-112.00
E c/r	-409.54	-336.56	-279.21	-103.45	81.13	91.17	207.45	100.23	-49.46	-191.87	-280.65	-352.64
Efen	-138.48	-102.47	-63.12	10.66	146.99	141.16	201.36	119.78	27.47	-34.56	-82.61	-120.32

inclinaison :45° ; orientation : 0°, -90°, 90°, 180° respectueusement ; dimension fenêtre : 2*2m												
Mj	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
E c/r	-670.54	-290.65	104.23	641.23	1135.12	1213.01	1299.01	1217.36	721.12	213.54	-344.47	-667
Efen	-435.67	-90.41	286.41	746.54	1174.32	1290.03	1290.33	1211.04	771.20	327.03	-181.23	-453.9
E c/r	-814.32	-568.44	-242.41	360.78	873.21	1041.32	1061.25	836.98	372.65	-109.04	-493.25	-7.31.25
Efen	-570.00	-364.32	-52.12	471.25	919.65	1056.32	1059.47	851.23	428.12	06.97	-324.12	-547.23
E c/r	-768.45	-473.14	-127.09	435.21	989.02	1153.17	1252.31	1071.32	465.25	-57.21	-472.32	-714.36
Efen	-532.87	1271.33	67.55	544.34	1022.3	1159.32	1247.03	1082.65	518.99	51.36	-321.01	-506.87
E c/r	-848.54	-661.25	-474.56	-2.29	572.65	837.12	869.02	521.11	23.65	-299.47	-550.06	-748.32
Efen	-611.00	-456.68	-281.73	119.19	629.32	861.67	867.00	541.36	91.14	-167.25	-384.15	-532.98

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

La contribution du transfert énergétique à travers l'ouverture au bilan énergétique de la chambre dépend vigoureusement de la taille de la fenêtre, de l'orientation et l'inclinaison.

Il est caractérisant que des grandes ouvertures testées (avec l'orientation et l'inclinaison considérée en excluant les fenêtres nordiques) provient un gain d'énergie dû aux radiations solaires plus important que les pertes de chaleur durant l'année.

Dans le cas de petites ouvertures sous considération indépendante de l'orientation, la période de chauffage est plus importante que celle du refroidissement. La saison de chauffage est plus longue pour une chambre avec une petite fenêtre. Elle égale à 6.5 mois pour toutes les orientations des chambres avec des murs verticaux considérés.

Pour des fenêtres plus grandes la durée de la période de chauffage sera réduite. Elle est seulement de 4 mois pour une chambre orientée vers le sud (avec mur vertical) et 6 mois pour une chambre orientée vers l'est ou l'ouest (7 mois pour le nord). Selon les suppositions faites (la température de la chambre est maintenue constante toute l'année grâce au HVAC système seulement, pas de casquettes ni d'occultations naturelles utilisées), une courte période de chauffage veut dire une plus longue saison de refroidissement (air conditionner).

En analysant le tableau, il est clair que les besoins énergétiques du refroidissement pour les chambres orientées vers le sud et ouest sont plus importants que ceux du chauffage (pour l'orientation sud l'énergie utilisée pour le refroidissement est 2 fois plus grande que celle du chauffage). Bien entendu, on peut dire que les espaces nordiques demandent bien plus d'énergie que ceux avec d'autre orientation.

Pour les grandes ouvertures (grandes fenêtres) les besoins énergétiques de chauffage pour une chambre sont similaires pour celle avec une façade inclinée ou verticale d'une même orientation. Il est évident que la différence entre les besoins de chauffage et de refroidissement est spécialement pour les chambres du grenier.

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Pour les petites fenêtres orientées vers le sud la période de refroidissement a la même durée que la période du chauffage. Pour des fenêtres plus grandes, elle est plus importante que celle du chauffage (huit mois).

Pour l'orientation sud, les besoins énergétiques pour le refroidissement sont trois fois plus grands que les besoins du chauffage, de l'orientation ouest; et deux fois et demie plus grands que ceux de l'orientation est.

La demande de refroidissement est spécialement plus élevée et ça de Mai à Août pour les chambres d'une orientation sud ; de Juin à Août pour celles de l'orientation West

Finalement on peut dire que : les chambres avec surfaces inclinées consomment le plus d'énergie ; elles ont besoin d'une très grandes quantité d'énergie pour le refroidissement, quand en générale celle de chauffage est au même niveaux.

Cette situation est due à la disponibilité des radiations solaires incidentes.

Les surfaces extérieures inclinées de 45° peuvent être exposées au soleil plus longtemps et recevoir des radiations solaires plus grandes que celles des surfaces verticales.

V- Comparaison et Validation

1- Comparaison

Les charges calculées du refroidissement du bâti ont été analysées, et un résumé est montré dans les figures 19, 20,21.

Les variations saisonnières distinctes peuvent être observées avec une demande de refroidissement maximale se produisant au cours de la période d'été pour les trois villes de Tlemcen (ouest algérien), Alger (centre algérien) et Tamanrasset (sud algérien).

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

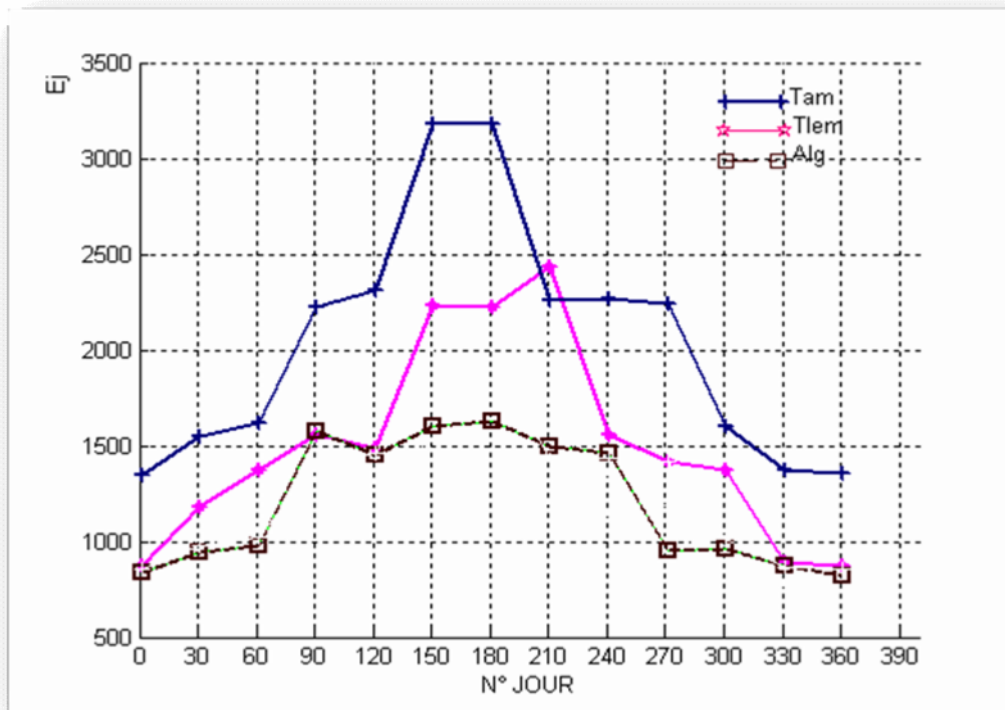


Figure 19 : Comparaison de la demande énergétique de refroidissement entre les trois sites considéré orientation ouest

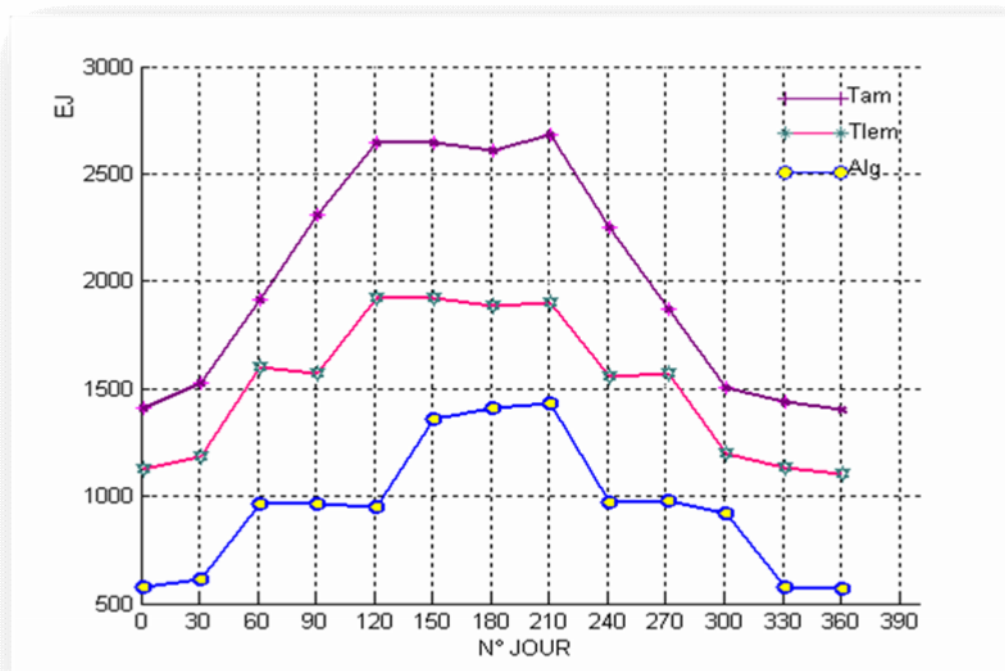


Figure 20 : Comparaison de la demande énergétique de refroidissement entre les trois sites considéré orientation est.

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

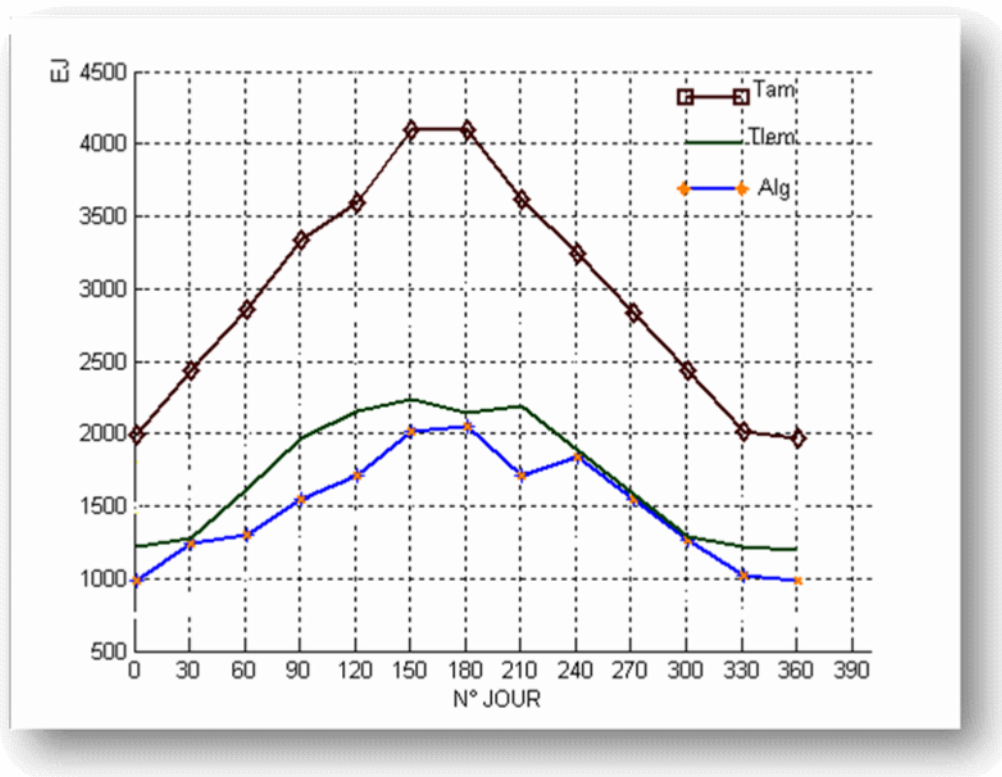


Figure 21 : Comparaison de la demande énergétique de refroidissement entre les trois sites considéré orientation sud.

Alger a montré relativement moins de variations dans la charge de refroidissement. Ce n'est pas étonnant, vu son site géographique (au bord de la mer avec une latitude de 36.7763° Nord et une longitude de 3.0585° est) et son climat; les besoins de refroidissement sont minime et se concentre uniquement en période estivale.

Même remarque pour la ville de Tlemcen qui a un climat un peu plus chaud que celui d'Alger en été, donc la différence à notre avis sera dans la période de refroidissement qui sera plus longue

Contrairement à Tamanrasset (ville du sud algérien, elle est située à $22^{\circ} 47'$ de latitude nord et $5^{\circ} 31'$ de longitude a une plus grande variation dans la charge et un maximum de besoin presque durant toute l'année surtout pour les chambres coté sud

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

(plus de 4000 w/m² pour la période d'été) un peu moins coté est, ce qui demandera une durée très longue de refroidissement qui s'étale sur deux saisons.

2- Validation du modèle

A notre connaissance des résultats expérimentaux effectués par ce modèle n'existe pas pour cela nous avons validé notre modèle baptisé MEES (modèle d'estimation énergétique solaire) par une comparaison avec le modèle GSR (model of global solar radiation) [Wan 2008] qui a été validé par des mesures expérimentales résultats sont montrés sur les figures suivante :

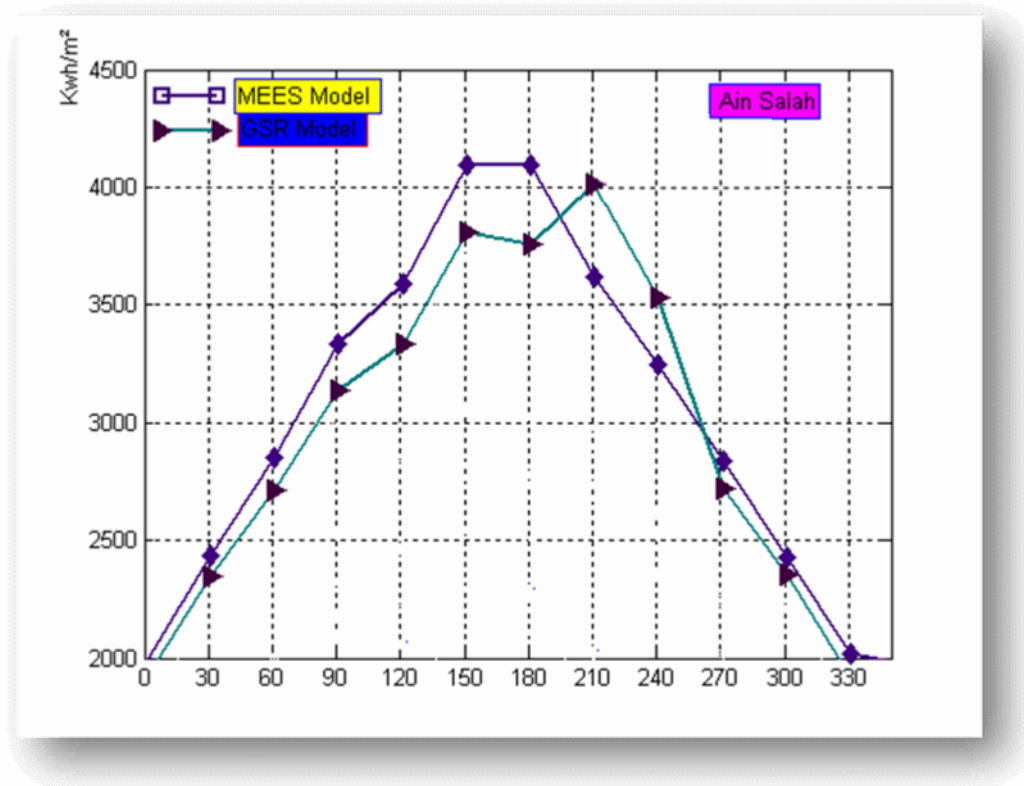


Figure 22 : Comparaison entre le modèle MEES et GSR application ville de Tamanrasset

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

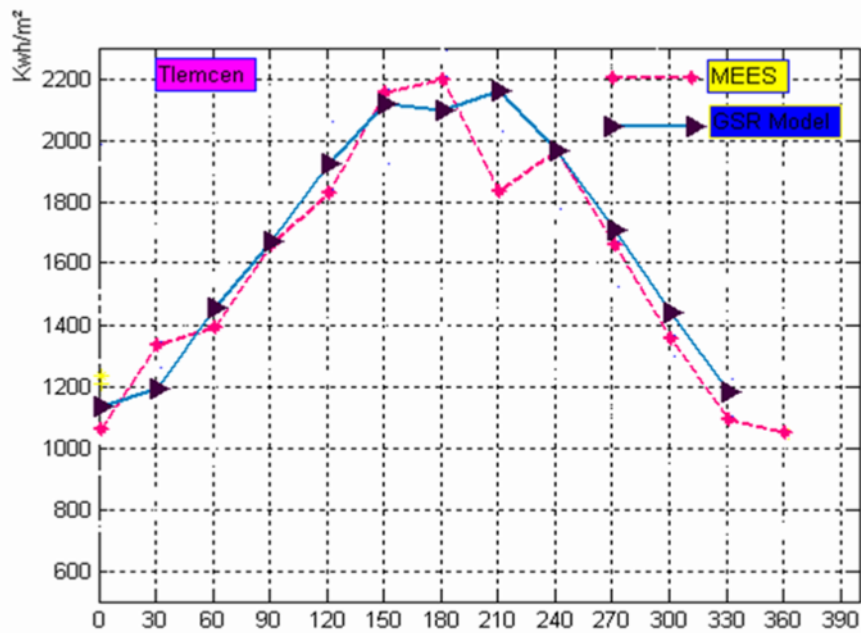


Figure 23 : Comparaison entre le modèle MEES et GSR application ville de Tlemcen

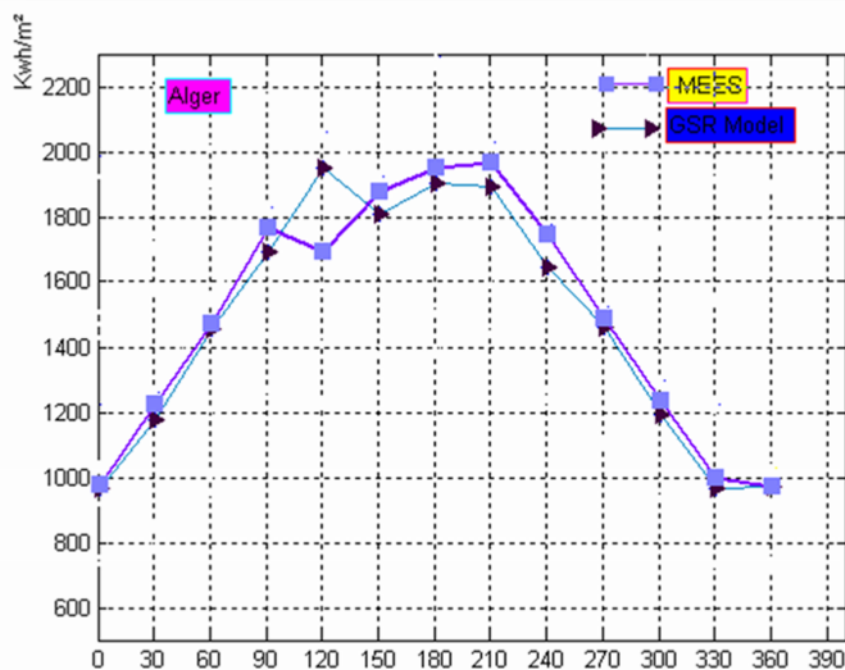


Figure 24 : Comparaison entre le modèle MEES et GSR application ville d'Alger

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Comme nous pouvons le constater l'estimation énergétique faite par MEES et en parfaite cohérence pour la période estivale avec celle faite par GSR,

Les charges de refroidissement mensuel de notre modèle ont une grande tendance à suivre ceux du modèle GSR.

L'impact d'utiliser le mees dans la simulation énergétique du bâtiment est qu'on peut étudier différentes zones climatiques à travers notre pays.

On a trouvé que la climatisation annuelle simulée diffère de 0.9 à 5.1% et un total de consommation énergétique de 0.1 à 3.6%.

Alors on peut dire que notre modèle a une tendance à surestimer les charges de refroidissement dans les zones froides dans le nord et vise vers ça pour les climats plus chauds dans le sud.

Cette surestimation fait augmenter les gains de chaleur solaires et donc diminuer les besoins de chauffage en hiver et augmenter ceux du refroidissement en été.

Nous constatons que les données du MEES peuvent être utilisées pour la simulation énergétique des bâtiments en toute fiabilité là où les mesures des énergies solaires ne sont pas disponibles.

VI- Conclusion

Le but principal de ce travail est de modéliser le bilan énergétique d'une maison solaire en fonction de l'impact des énergies solaires incidentes.

Le modèle présenté MEES a été employé pour la simulation numérique et des résultats de la simulation ont été affichés et discutés

En Algérie, comme dans quelques autres pays de même latitude, les bâtiments sont construits avec une focalisation sur des conditions climatiques d'hiver et la

CHAPITRE IV RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE

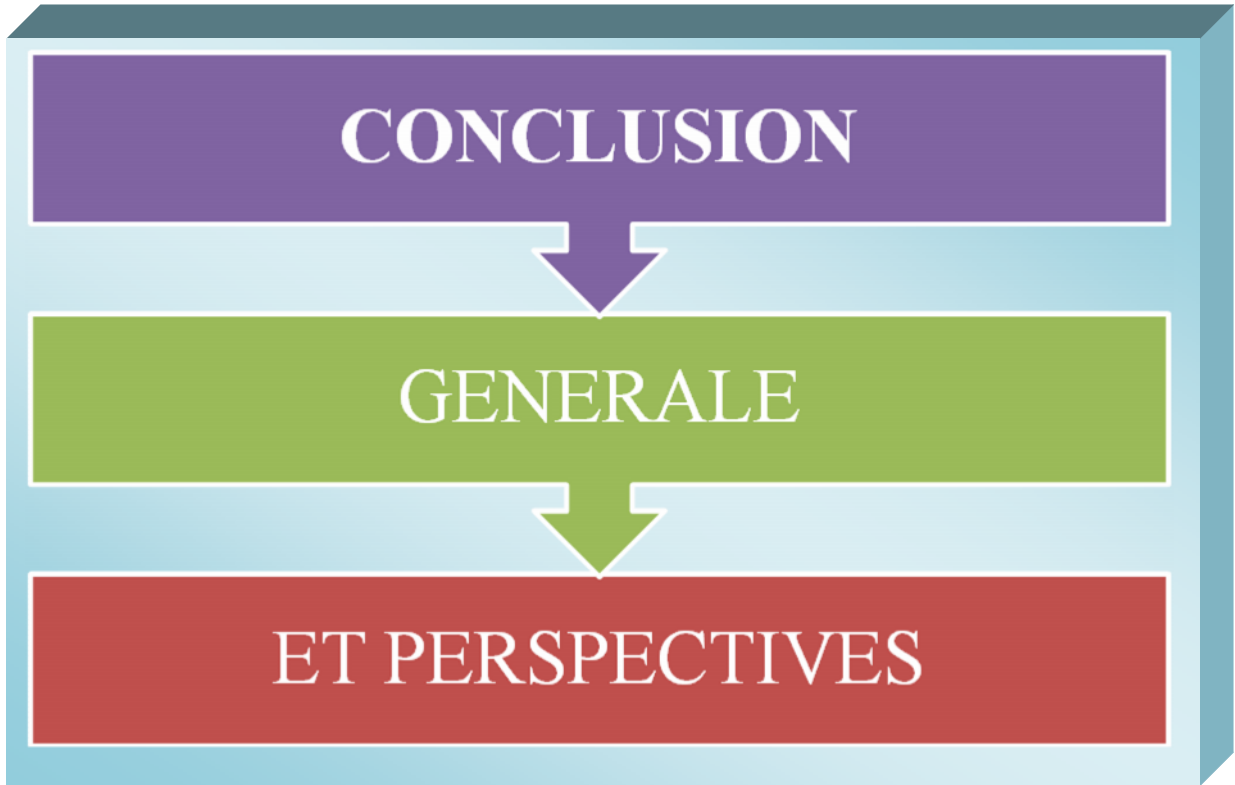
réduction des besoins de chauffage des locaux qui est traitée comme priorité dans les mesures d'économies d'énergie.

Cependant, les résultats de la simulation de l'étude présentée montrent que les surchauffes en été qui sont dû à l'irradiation solaire élevée posent un problème réel pour l'architecte, le constructeur et l'habitant et influent directement sur son confort intérieur.

Pour éviter ces surchauffes, selon les prétentions faites dans le modèle présenté (pour garder une température constante dans la chambre) il est nécessaire d'employer un ombrage interne ou externe (cependant, il n'est pas aussi facile dans le cas des salles de grenier) ou bien améliorer les caractéristiques thermiques et optiques des fenêtres.

Si on ne prend pas ces disposition au début les occupants seront obligés d'utiliser des systèmes de refroidissement actifs, sachant que l'utilisation de tels systèmes nécessitera une grande puissance énergétique surtout si on utilise les systèmes HVAC électriques. Si on n'améliore pas les technologies de conception des bâtiments et si on ne prend pas en considération l'orientation et les matériaux utilisés, le système de construire l'utilisation de parois complexes par exemple, le secteur de bâtiment deviendra le plus grand marché croissant des dispositifs de climatisation.

Donc l'étude énergétique qui concerne la période hivernale n'est pas suffisante il faut concevoir nos bâtiments en fonction de la période estivale et hivernale au même temps.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le souci croissant d'une meilleure gestion de l'énergie respectant le bien-être des gens est à l'origine des développements importants des codes de simulation énergétique des bâtiments. De plus, l'essor spectaculaire des moyens informatiques permet l'intégration d'un nombre croissant de phénomènes physiques au sein des modèles.

Cette diversité grandissante des modèles pose naturellement le problème de leur exhaustivité ainsi que de leur représentativité.

De plus, les difficultés de résolution provoquées par cette diversification soulèvent le problème de fiabilité numérique souvent sous-estimé auparavant.

Notre travail s'inscrit dans le cadre du développement d'outils de simulation intégrant plusieurs phénomènes physique différents. L'objectif est de fournir un outil de modélisation et de simulation permettant d'estimer les énergies incidentes dans une maison en fonction de son site et des conditions météorologiques pour contribuer au développement des bâtiments à basse consommation d'énergie en proposant une méthodologie d'évaluation des performances thermiques nécessaire avant tout choix de solutions. Les performances évaluées sont les besoins de chauffage, de climatisation et le confort thermique d'été.

Dans la première étape, un état de l'art des bâtiments à basse consommation d'énergie a été réalisé. L'analyse des différents postes énergétiques tant au niveau de la conception de l'enveloppe des bâtiments que des équipements techniques a mis en évidence les axes sur lesquels doivent porter les efforts en matière de consommations énergétiques. La présentation de nombreux bâtiments à haute efficacité énergétique labellisés ou non prouve que pour la construction neuve ou la rénovation de bâtiments anciens, il est possible d'atteindre d'excellents niveaux d'exigence de performance avec un surcoût inférieur à 10%. Le secteur du bâtiment possède ainsi un potentiel considérable pour la réduction des consommations d'énergie, la différence très importante entre les performances énergétiques des bâtiments conventionnels et des bâtiments à énergie positive le prouve.

CONCLUSION GENERALE

Aussi, nous avons voulu mettre en valeur les parois complexes leur utilité surtout pour l'isolation thermique. Au départ d'une synthèse bibliographique, nous avons présenté les différentes études réalisés à ce sujet, ce qui nous a permis dans un premier temps de constater des différences majeurs entre les pratiques internationales ce qui nous amène à vouloir créer notre propre pratique. Nous avons également montré la problématique de caractérisation des performances thermiques et celle de la modélisation des phénomènes intervenant dans ces parois et dont la finalité est l'intégration à un code de calcul du comportement énergétique des maisons thermosolaires

Ces éléments nous ont permis de proposer une méthodologie en deux volets :

- Le premier à caractère réglementaire, dont le but était de déterminer des indicateurs simples, permettant de caractériser les performances thermiques et la protection solaire de parois complexes. La démarche que nous avons proposée est basée sur des études au départ d'un environnement de recherche dédié à ces travaux
- Le second à caractère scientifique, dont l'objet était la meilleure connaissance du comportement thermique des parois multicouche. La méthode utilisée est basée sur un prototype de code de simulation énergétique des bâtiments, pour lequel des développements spécifiques ont été entrepris.

Afin de répondre au volet scientifique de la méthodologie, nous avons dans un premier temps élaboré un modèle détaillé de notre système d'étude, au départ du prototype de code de simulation énergétique des bâtiments MEES. Le modèle inclut l'ensemble des transferts thermiques aérodynamiques et hydriques que nous avons identifiés.

Il apparaît clairement que des efforts importants sont à faire sur le mode de conception du bâtiment, et sur l'analyse de l'impact des solutions techniques sur les besoins énergétiques du bâtiment. Les solutions doivent porter sur tous les postes et il est primordial d'effectuer une évaluation des performances des différentes solutions avant de choisir les plus adéquates.

CONCLUSION GENERALE

Le but de la présentation de plusieurs méthodes et techniques de conception, de modélisation et de décision montre qu'il existe de nombreuses connaissances dans les domaines scientifiques et industriels qui peuvent avoir des applications importantes dans le domaine du bâtiment. La conception rationnelle dans le bâtiment pourrait être restructurée autour de l'approche de décision rationnelle pour laquelle le choix de solutions par les différents acteurs de conception peut se faire suivant quatre étapes : la recherche d'information, la modélisation, le choix et la validation.

Notre modélisation, s'avère être un bon compromis combinant la précision des simulations dynamiques et la rapidité des modèles simplifiés.

Le modèle issu de l'analyse des flux thermiques dont le bâtiment est le siège ont l'avantage de la simplicité et offrent la possibilité d'étudier un grand nombre de paramètres de conception.

La dernière partie, concerne l'application de la méthode dans le but d'évaluer les besoins de climatisation et le confort thermique d'été d'un logement situé dans une zone climatique modérée (Tlemcen) et une chaude (Tamenraset). Pour ces cas, le modèle fourni une précision satisfaisante. Comme attendu, les efforts doivent se faire l'inertie thermique sans oublier la ventilation. Basé sur ce modèle nous pensons donner, un outil prototype de choix des solutions à partir des exigences des concepteurs. Il allie facilité d'utilisation et possibilité de faire un choix évolutif des solutions rapidement. Ce type d'outils pourrait contribuer à une nouvelle génération d'outils pour l'évaluation des performances des bâtiments.

Dans ce travail nous avons proposé une méthode d'évaluation thermique des bâtiments. Cependant, l'application de la méthode reste limitée aux sites choisis. Il est clair que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour une application à d'autres cas et d'autres aspects de la performance des bâtiments. Les perspectives de ce travail peuvent s'articuler selon trois axes :

Les résultats obtenus avec la méthode développée dans le cadre de cette thèse étant encourageants, il peut être envisagé d'étendre l'application de cette méthode à

CONCLUSION GENERALE

d'autres typologies que se soit pour le secteur résidentiel ou tertiaire, et pour plusieurs zones climatiques. Il est à noter aussi que le nombre de paramètres étudiés pourrait être plus important que celui qui a été retenu dans le cadre de ce travail notamment pour les bâtiments à géométrie complexe. Il serait aussi très intéressant d'étudier la variation des coefficients des modèles simplifiés en fonction de plusieurs types d'inertie thermique. Il peut être également envisagé d'intégrer dans ces coefficients l'effet des systèmes de chauffage et de climatisation avec leurs sources d'énergies et les scénarios de contrôle.

NOMENCLATURES

NOMENCLATURES

T : température

F : flux [W]

S : Surface [m²]

E : Eclairement (W.m⁻²)

f : facteurs de formes

R : Radiosité.

M : Emittance [W/m²]

V : Vitesse de vent [m/s]

d : Diffusivité thermique

h : Coefficient d'échange [W.m⁻² .K]

E : Epaisseur [m]

Nu : Nombre de Nusselt

r : Résistance thermique [K.m²/W]

t : temps

Les symboles grecs :

ρ_p : Réflectivité de la paroi p

ε_p : Émissivité

σ : Constante de Stefan-Boltzmann [5.68.10⁻⁷ W/m² .K⁴]

α : Inclinaison de la paroi p [rad]

δ : Symbole de Kronecker

Δ : Ecart

λ : Conductivité thermique [W/m.K]

μ : Densité de flux [W/m²]



Références
Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [ADEME] Guide de l'écoconstruction, ADEME, Conseil général de la Lorraine, Agence de l'eau.
- [AIVC.87] Aivc Technical note AIVC 20. Airbone moisiture transfer: New Zeland Workshop. Proceedings and bibliographic Review. Berkshine (RU) : AIVC, 1987.
- [Allard 1986] Allard, F., Inard, C., Roldan, A. Etude comparative de différentes méthodes de modélisation des échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde dans une cellule d'habitation. Annales de l' I.T.B.T.P. 1986, n°442. 60 p.
- [AssoHQE 2008] Association HQE (2008). Site internet. URL : <http://www.assohqe.org/>
- [Awbi, 1999]. Awbi, H.B., Hatton, A. Natural convection from heated room surfaces. Energy and Buildings. 30 (1999) 233-244
- [Bansal, 1994] Bansal, N.K., Hauser, G., Minke, G. Passive Building design – a handbook of natural climatic control. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1994. 336 p. ISBN: 0-444-81745-X
- [Beausoleil- Morrison, 2000] Beausoleil-Morrison, I. The adaptive coupling of heat and airflow modelling within dynamic whole-building simulation Ph.D. Thesis : University of Strathclyde, 2000.
- [Beausoleil, 2002] Beausoleil-Morrison, I. The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces. Building and Environment. 37 (2002) 791-806
- [BedZed 2008] BedZed. (2008). Disponible en ligne. URL <http://www.peabody.org.uk/bedzed/>
- [Berges, 1986] Berges, B. Analyse du comportement conductif de l'enveloppe d'un bâtiment : recherche de modèles de transfert pour un flux monodimensionnel au travers des parois opaques. Thèse : Sci. : Université de Nice. 1986. 296 p.
- [Bernier 2006]. BERNIER, M. (2006). Simulation de maisons « zéro-net ». Journée thématique SFT-IBPSA. Chambéry. Communication orale.
- [blower-door] Site web : <http://www.blower-door-test.net>.
- [Boyer, 1993] Boyer, H. Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles . Thèse Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1993.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**Boyer, 2001**] Boyer, H., Lauret, P., Younes, A., Bastide, A., Mara, T. D'un code de simulation thermique du bâtiment à l'observation d'état : présentation de deux applications. Vème Colloque Inter-Universitaire Franco-québécois, Lyon, mai 2001

[**Boyer 2010**] Boyer H., F. Miranville F. , Payet F., Low energy architecture in the tropics: from design to building construction, IASTED Power and Energy Systems, September, 2010, Gaborone, Botswana,

[**Brau, 1992**] Brau, J., Roux, J.J., Krauss G. Cahier des logiciels CODYBA. Paris : AFME

[**BREEAM 2008**] BRE Environmental Assessment Method (2008). Site internet. URL : <http://www.breeam.org/> qui

[**Cacavelli, 1988**] Caccavelli, D. Modélisation du comportement thermique des bâtiments multizones : adaptation à un processus de conception. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1988. 477 p.

[**Chapman, 1974**] Chapman, A. J., Heat transfer. 4e éd. New York : Macmillan Publishing Compagny, 1974. 608 p. ISBN 0-02-321470-8

[**CASBEE 2008**] CASBEE (2008). Site internet. URL <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/overviewE.htm>

[**Citherlet, 2001**] Citherlet, J.A., Clarke, J.A., Hand, J. Integration in building physics simulation , Energy and Buildings, 33 (2001), pp. 451- 461.

[**Chlela 2008**] F. Chlela, Développement d'une méthodologie de conception des bâtiments à basse consommation d'énergie, Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 2008.

[**Chwieduk 2009**] Chwieduk Dorota A, Recommendation on modelling of solar energy incident on a building envelope, Renewable Energy 34 (2009) 736–741

[**Cyril 2006**] Cyril Simon Contribution à l'étude des entrées d'énergie solaire dans l'ionosphère : ions doublement chargés et transport cinétique des protons Thèse Sci : Université Joseph Fourier de Grenoble, France Le 19 juin 2006

[**Disch 2008**] DISCH, R. (2008). Das Plusenergiehaus. Site internet. URL : <http://www.plusenergiehaus.de>.

[**Duta, 1998**] Duta, A. Etudes thermiques et aérauliques des structures légères double-paroi avec effet pariétodynamique. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1998. 172 p.

[**Elsherbiny, 1996**] Elsherbiny, S. M., Free convection in inclined air layer heated from above. International Journal of Heat and Mass Transfer. 39 (1996) 3925-3930

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Enev 2004] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden“. Réglementation thermique allemande. Disponible en ligne. URL : <http://enev-normen.enev-online.de>

[Ellis, 1999] Ellis, M.W., Mathews, E.H. A new simplified thermal design tool for architects, *Building and Environment*, 36 (2001), pp. 1009-1021.

[Estet 97] Estet, Notice d'utilisation version 3.3, simulog- EDF, Paris, 1997

[Fauconnier, 1986] Fauconnier, R., Grelat, A., Thermique de l'habitat : bases de la modélisation thermique. *Annales de l' I.T.B.T.P.*, 1981, n°395. p. 123-138. Génération automatique de modèles zonaux pour l'étude du comportement thermo-aéroulque des bâtiments

[Feist 2005] W. Feist, J. Schnieders, V. Dorer, A. Haas, Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept, *Energy and Buildings* 37 (11) (2005) 1186-1203.

[Fluent 98] Fluent User's guide version 5.0, Fluent Incorporated, Lebanon, NH (USA),1998.

[Fortin, 2001] Fortin, A. Analyse numérique pour ingénieurs. 2e éd. Montréal : Presses internationales Polytechnique, 2001.

[Garde, 2001] Garde, F. Validation de codes de simulation thermo-aéroulque du complexe bâtiment/systèmes de climatisation. Application à la conception thermique des bâtiments. H D R, Université de La Réunion : 2001, 214 p.

[Garde, 2001] Garde, F., Lucas, F., Boyer, H., Brau, J. Multiple model approach of a residential heat pump for integration in building thermal simulation code and comparison with experimental results. *ASHRAE Transactions*, Atlanta, janvier 2001.

[Garde 2001] Garde F, Boyer H, Célaire R, Bringing simulation to implementation : Presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates., *Solar Energy*, Vol.71, 2001, p.109-120

[Garde 2006] Garde F., Bastide A., Bentaleb D., Ottenwelter E., Presentation of a new approach of building design for the realisation of a ZEN building in Reunion island., *Transactions of ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 2006,

[Garde 2007] Garde F, Bastide A, Wurtz E , Achard G, Dobre O, Thellier F, Ottenwelter E, Ferjani N, Bornarel A , ENERPOS : A National French Research Program for developing new methods for the Design of Zero Energy Buildings., *CESB 07, Central Europe towards Sustainable Buildings*, September, 2007, Prague, Czech Republic,

[Gan, 1998] Gan, G., A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings , *Energy and Buildings*, 27 (1998), pp. 37- 43.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Gebhart, 1957] Gebhart, B. Unified treatment for thermal radiation transfer processes – Gray, diffuse, radiators and absorbers. ASME, 57- A-34. 1957.

[Guiavarch 2003] A. Guiavarch, Etude de l'amélioration de la qualité environnementale du bâtiment par intégration de composants solaires, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2003.

[HDR Ghiaus] Rapport de l'habilitation à diriger les recherches du professeur Cristian Ghiaus Insa Lyon France.

[Hoang, 1990] Hoang, T. H. Etudes dynamiques et thermique d'écoulements d'air dans une cavité de grand rapport d'allongement en régime instationnaire – Application à une paroi à lames d'air ventilées. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1990. 133 p.

[Hottel, 1954] Hottel, H.C. Radiant heat transmission. 3ème éd. New York: Mc Graw-Hill Book Compagny, 1954.

[Hu, 2001] Hu, W. Contribution à l'étude du couplage du rayonnement thermique avec la technique CFD dans le contexte du bâtiment. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001. 233 p.

[Incropera, 1996] Incropera, F. P., Dewitt, D. P. Introduction [De Vriendt, 1984]: De Vriendt, A. B., La transmission de la chaleur – Volume 2 . Québec: Gaëtan Morin, 1984. 372 p. ISBN: 2-89105-083-5.

[IEA.92] IEA Annex XIV. Condensatio and energy. Report Annex XIV, vol 1 Sourcebook Leuven (Belgique) : International Energy Agency. Energy Conservation in building and Community Systems Programme, 1992,

[INARD 96] INARD, C, BOUIA, H, DALACIEUX, P Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model. Energy and Buildings, 1996 vol 24 n°2 p 125 -- 132.

[JORF 2006] Journal Officiel. (2006). Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles des bâtiments, Journal Officiel de la République Française no 121 du 25 mai 2006.

[JORF 2007] Journal Officiel. (2007). Arrêté du 8 mai 2007 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique », Journal Officiel de la République Française no 112 du 15 mai 2007.

[Khalifa, 2001] Khalifa, A-J. N., Natural convection heat transfer coefficient – a review – II Surfaces in two and three dimensional enclosures . Energy Conversion and Management. 42 (2001) 505-517

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Klimahaus 2008]** Klimahaus/Casaclima. Site Internet : <http://www.klimahausagentur.it/>
- [Krauss, 1989]** Krauss, G. Cours polycopié : Aéraulique et bilan thermique. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire Equipement de l'Habitat, 1989. 53 p.
- [KOLBUT 91]** KOLBUT, K, TUOMAALA, P, SIREN, K, SEPPANEN, O. Simultaneous calculation of airflows temperatures and contaminant concentrations in multizone buildings 12 AIVC conference, Ottawa (Canada) 1991.
- [Lauret 2006]** Lauret P., David M., Fock E., Bastide A., Rivière C. , Bayesian an Sensitivity Analysis Approaches to Modelling The Direct Solar Irradiance, Journal of Solar Energy Engineering, Vol.128, august, 2006, p.394-405
- [Lauret 2006]** Lauret P., Miranville F., Boyer H., Garde F., Adelard L., Bayesian Parameter Estimation of Convective Heat Transfer Coefficients of a Roof-Mounted Radiant Barrier System, Transactions of ASME,International Journal of Solar Energy Engineering, Vol.128, May, 2006, p.213-225
- [Lucas, 2001]** Lucas, F. Développement et validation des échanges thermohydrauliques dans les bâtiments – Influence de la condensation et des systèmes de traitement d'air couplés au bâtiment. Thèse Sci. : Université de La Réunion, 2001. 236p.
- [Lucas 2004]** F. Lucas, F. Miranville, Indoor humidity modeling and evaluation of condensation on interior surfaces, ASHRAE transaction, Vol.Vol 110, 2004, p.300-308
- [Maugard 2005]** MAUGARD, A., MILLET, J.-R., QUENARD, D. (2005). Vers des bâtiments à énergie positive Présentation du CSTB. Disponible en ligne. URL : http://www.cstb.fr/batimat2005/presentations/vers_des_bepos.pdf
- [Minergie 2008]** Site Internet. URL : <http://www.minergie.ch>
- [Miranville 2003]** Miranville F., Boyer H., Mara T. and Garde F., On the thermal behaviour of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid climatic conditions, Energy and Buildings, Vol.35, 2003, p.997-1008
- [Mora 2003]** Laurent MORA Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet Thèse 2003 UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE
- [Moudjaled 2007]**. Bassam Modjaled Modélisation du confort thermique des bâtiments naturellement ventilés Thèse : Sci Ecole doctorale :MEGA Spécialité : Génie Civil Janvier 2007.URA CNRS.
- [outilssolaires]** Site web : <http://www.outilssolaires.com>.
- [Passivhaus 2008]** Passivhaus Institut (2008). Site Internet ; URL : <http://www.passiv.de>
- [Perez-Sanchez, 1989]:**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**Poljak, 1935**] Poljack, G. Analysis of heat interchange by radiation between diffuse surfaces. Tech. Phys. USSR, 1 (1935), pp. 555-590.

[**Réglementation thermique 2005**] Réglementation thermique 2005, des bâtiments confortables et performants, Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement, CSTB 2006.

[**R2000 2005**] Norme R-2000. Ressources naturelles Canada. Avril 2005. Disponible en ligne.

[**Roldan, 1985**] Roldan, A. Etude thermique et aéraulique des enveloppes de bâtiment. Influence des couplages intérieurs et du multizonage. Thèse : Sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1985. 310 p.

[**SEMPEY, 2008**] Alain SEMPEY : Prise en compte du champ thermo-convectif pour le contrôle thermique des espaces habitables Thèse : SCI, UNIVERSITE DE LA ROCHELLE UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'ingénieur

[**Sunh&Shine2001**] Sunh&Shine Sustainable energy in housing projects, CD ROM, 2001.

[**solares- bauen**] Site web : <http://www.solares-bauen.de>.

[**Solarsiedlung**] Solarsiedlung am Schlierberg, Freiburg (Breisgau), Germany, PV UPSCALE, 2007, disponible sur: www.pvupscale.org.

[**solarserver**] Site web : <http://www.solarserver.de>.

[**Schlueter 2009**] A. Schlueter, F. Thesseling, Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages, Automation in Construction 18 2) (2009) 153-163.

[**Météo dz**] www.météo.dz

[**USGBC 2008**] U.S. Green Building Council (2008). Site Internet. URL : <http://www.usgbc.org/>

[**URL 2005**] <http://oee.nrcan.gc.ca/residentiel/personnel/maisons-neuves/r-2000/standard/derniere-version/r-2000-norme-avril-2005.pdf>

[**Voss 2007**] VOSS, K, KRAMP M. (2007). "Zero-energy/emission-buildings" - terms, definitions and building practices, Actes de la conférence Central Europe towards Sustainable Building (CESB 07). Prague. pp. 547–552.

[**Walton, 1982**] Walton, G. N. Airflow and multiroom thermal analysis. Ashrae Transactions, 1982. Volume 88, Part. 2. p. 78-91

[**Wan 2008**] Kevin K.W. Wan, K.L. Cheung , Dalong Liu , Joseph C. Lam Impact of modelled global solar radiation on simulated building heating and cooling loads 2008 Energy Conversion and Management elsevier

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**Woloszyn, 1999**] : Wolosyn, M. Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones. Proposition d'une stratégie de résolution du système couplé . Thèse. Sci. : INSA de Lyon. 1999.

[**Wong 2005**] WONG, J.K.W., LI, H., WANG, S.W. (2005). Intelligent building research: a review, Automation in construction. Vol 14 (1). pp. 143–159.

[**WURTZ, 99**] WURTZ, E, MUSY, M, MORA, L. Description des écoulements d'air à l'aide de la méthode zonale : influence de panaches jets d'air et couches limites. Dans les actes du IVE colloque interuniversitaire franco- québécois Montréal Canada Presse internationales polytechnique, mai 1999.

[**YERRO, 1997**] Yerro, P. Etude expérimentale des champs de température et de vitesse d'un bardage thermique. Thèse : Sci. : Université des Antilles-Guyane. 1997. 164 p.