

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT  
D'UN OUTIL DE SIMULATION ENERGÉTIQUE  
DE BÂTIMENTS

DUO OYONO MICK WILLY RANDRIAMIARINJATOVO  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE MÉCANIQUE)  
FÉVRIER 2003

© Duo Oyono Mick Willy Randriamiarinjatovo, 2003.

National Library  
of Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

Acquisitions et  
services bibliographiques

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file   Votre référence*

*ISBN: 0-612-83227-9*

*Our file   Notre référence*

*ISBN: 0-612-83227-9*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

**Canada**



UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

DÉVELOPPEMENT  
D'UN OUTIL DE SIMULATION ENERGÉTIQUE  
DE BÂTIMENTS

présenté par: RANDRIAMIARINJATOVO Duo Oyono Mick Willy  
en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées  
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. REGGIO Marcelo, Ph.D., président

M. BERNIER Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. KAJL Stanislaw, Ph.D., membre

## DÉDICACE

*One day at a time SJ.*

## REMERCIEMENTS

J'aimerais adresser mes sincères remerciements au gouvernement canadien qui a la bonne intention de promouvoir la formation dans les pays en développement par le biais du programme canadien de bourses de la francophonie (PCBF) sous la tutelle de l'Agence canadienne de développement international (ACDI). Sans cette aide, mon aventure au Canada n'aurait pas vu le jour.

Ma spéciale gratitude s'adresse ensuite au professeur Michel Bernier qui a bien voulu me diriger dans ce travail de recherche. Il a su montrer ses compétences et son dévouement à mon endroit dans un caractère très humain et encourageant.

Je tiens à remercier le professeur Marcelo Reggio, président du jury et le professeur Stanislaw Kajl, membre du jury, qui ont eu la patience de bien vouloir porter leur jugement à cet humble travail.

J'adresse ma gratitude particulière à ma femme, Rojo, qui m'a toujours supporté malgré la distance, pour son amour, sa patience et son courage. *Mankasitraka, vady malalako, ho an'ny avin'ny ankohonantsika*. Et de gros bisous pour mes deux petites filles. Je remercie chaleureusement mes parents et beaux-parents, mes frères et sœurs pour leurs soutiens et prières.

J'adresse aussi mes remerciements à mes collègues du local C-307 (Stéphane, Nima, Jean-François, Demba, Dominique, Alain et Patrice) qui ont su créer une ambiance fraternelle tout au long de nos périples, ainsi qu'à Hasina, Eulalie et la famille Nagiar pour leur amitié sincère.

Finalement, j'aimerais remercier tous ceux qui ont, de près ou de loin, partagé leur aide, soutien et sourire pour rendre agréable mon séjour au Canada.

## RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif de développer un logiciel permettant de déterminer les besoins énergétiques horaires d'un bâtiment. Les phénomènes physiques suivants sont pris en compte par le logiciel : la conduction thermique transitoire au travers les parois opaques, la convection et les échanges de grandes longueurs d'onde au niveau des surfaces internes et externes des parois, les gains solaires au niveau des surfaces extérieures, les gains solaires à travers les fenêtres et les gains dus aux sources thermiques internes.

L'étude part du principe qu'il est possible de modéliser tout bâtiment en quatre zones périphériques et une zone interne. Les différents processus thermiques cités ci-dessus se retrouvent dans chacune des zones.

La relation de Fourier pour la conduction transitoire est résolue par différence finie en utilisant un schéma complètement implicite, selon la méthode de Patankar. La discrétisation est réalisée en constituant trois noeuds dans chacune des couches qui composent la paroi opaque. Comme ces parois peuvent contenir cinq couches de matériaux, nous avons en tout quinze noeuds.

Le calcul des gains solaires au travers les fenêtres fait appel à la méthode du SHGC (*solar heat gain coefficient*). Les gains internes dans chacune des zones proviennent des occupants, de l'éclairage et des équipements. La portion convective de ces gains contribue immédiatement à la charge d'une zone alors que la portion radiative est absorbée par les surfaces internes pour être relâchée ultérieurement. L'importance des gains internes au fil d'une journée et au cours de la semaine suit un profil établi en fonction de l'occupation du bâtiment.

Les échanges de grandes longueurs d'onde sont basés sur un calcul des facteurs de forme approximatif. Cette méthode s'avère efficace et pratique pour un bâtiment à géométrie quelconque. Les pertes thermiques au niveau d'une fenêtre sont évaluées à l'aide des facteurs de déperdition thermique  $U$ .

Le logiciel, baptisé B5EES, est validé avec un outil de validation analytique proposé par ASHRAE. Cette validation, effectuée sur cinq tests, montre que le logiciel donne de bons résultats. La validation avec l'outil BESTEST révèle également de bonnes cotes pour les quatre tests possibles.

## ABSTRACT

The scope of this study is to develop a user-friendly software to evaluate building hourly loads. The following physical phenomena are taken into account: transient thermal conduction through opaque walls, convection and long wave radiation interchange at the internal and external surfaces, solar heat gains on external surfaces, solar heat gains through the windows and internal gains due to indoor thermal sources.

The present model assumes that any building can be modeled by four peripheral zones and an internal zone. The different thermal processes mentioned above occur in each of these five zones.

The Fourier transient conduction equation is solved by finite difference using an implicit scheme, according to the method proposed by Patankar. Each wall layer has three grid points. Since wall can contain up to five layers, calculations will be performed for a total of fifteen grid points

Solar heat gains through the windows use the Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) approach proposed by ASHRAE. The internal gains in each zone come from the occupancy, the lighting and equipments. The convective portion of these gains contributes immediately to the zone load while the radiative portion is absorbed by the internal surfaces and released later. These internal gains follow an established profile according to building occupation.

The long wave radiation exchange uses an approximate view factor calculation which can handle any building shape with good accuracy. The thermal losses through the windows are calculated with the overall heat transfer coefficient  $U$ .

The software developed here, which is called B5EES, is validated with an ASHRAE analytical validation tool. The results of this validation, performed for five different tests, show that B5EES gives good results. The validation with BESTEST also reveals good results for the four possible simulated tests.

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                                           |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| DÉDICACE .....                                                                                                            | iv     |
| REMERCIEMENTS .....                                                                                                       | v      |
| RÉSUMÉ .....                                                                                                              | vi     |
| ABSTRACT .....                                                                                                            | viii   |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                                                                                  | x      |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                                                                  | xvi    |
| LISTE DES FIGURES .....                                                                                                   | xviii  |
| LISTE DES ANNEXES .....                                                                                                   | xxii   |
| INTRODUCTION .....                                                                                                        | 1      |
| <br>CHAPITRE 1 - REVUE DE LA LITTÉRATURE.....                                                                             | <br>5  |
| 1.1 Anciens programmes de simulation.....                                                                                 | 5      |
| 1.1.1 DOE-2 .....                                                                                                         | 6      |
| 1.1.2 BLAST .....                                                                                                         | 7      |
| 1.1.3 TRNSYS .....                                                                                                        | 8      |
| 1.2 Nouvelles générations de programmes de simulation .....                                                               | 9      |
| 1.2.1 EnergyPlus .....                                                                                                    | 9      |
| 1.2.2 PAPTER.....                                                                                                         | 10     |
| 1.2.3 EE4.....                                                                                                            | 11     |
| 1.3 Simulation en fonction du type de régulation : <i>energy rate control et</i><br><i>temperature rate control</i> ..... | 13     |
| 1.3.1 Approche de <i>energy rate control</i> .....                                                                        | 13     |
| 1.3.2 Approche de <i>temperature rate control</i> .....                                                                   | 14     |
| <br>CHAPITRE 2 - LE BÂTIMENT ET SON ENVELOPPE .....                                                                       | <br>16 |
| 2.1 Introduction.....                                                                                                     | 16     |
| 2.2 Conversion géométrique du bâtiment .....                                                                              | 16     |

|     |                                                          |    |
|-----|----------------------------------------------------------|----|
| 2.3 | Composition des couches de l'enveloppe du bâtiment ..... | 19 |
|-----|----------------------------------------------------------|----|

### CHAPITRE 3 - TRANSFERT THERMIQUE TRANSITOIRE AU TRAVERS DES SURFACES OPAQUES .....

|         |                                                                        |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1     | Introduction.....                                                      | 21 |
| 3.2     | Hypothèses.....                                                        | 22 |
| 3.3     | Équation gouvernante .....                                             | 23 |
| 3.4     | Résolution de l'équation de conduction.....                            | 24 |
| 3.4.1   | Maillage des surfaces opaques.....                                     | 24 |
| 3.4.1.1 | Exemple .....                                                          | 25 |
| 3.4.2   | Propriétés physiques associées aux nœuds des volumes de contrôle ..... | 27 |
| 3.4.2.1 | Cas des interfaces.....                                                | 28 |
| 3.4.2.2 | Exemple .....                                                          | 29 |
| 3.4.3   | Cas des noeuds internes .....                                          | 30 |
| 3.4.4   | Cas des noeuds aux frontières.....                                     | 31 |
| 3.4.5   | Conditions de frontière .....                                          | 32 |
| 3.4.5.1 | Gains solaires externes.....                                           | 33 |
| 3.4.5.2 | Gains solaires à travers les surfaces transparentes.....               | 33 |
| 3.4.5.3 | Échanges de grandes longueurs d'ondes.....                             | 34 |
| 3.4.5.4 | Gains internes.....                                                    | 34 |
| 3.4.5.5 | Convection interne.....                                                | 34 |
| 3.4.5.6 | Résumé.....                                                            | 35 |

### CHAPITRE 4 - ÉCHANGES THERMIQUES AUX SURFACES EXTERNES DES

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| PAROIS .....                            | 36 |
| 4.1 Introduction.....                   | 36 |
| 4.2 Irradiations solaires.....          | 36 |
| 4.2.1 Irradiation solaire directe ..... | 37 |
| 4.2.2 Irradiation solaire diffuse.....  | 38 |

|                                                                        |                                                                         |    |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.3                                                                  | Irradiation solaire diffuse réfléchie.....                              | 38 |
| 4.2.4                                                                  | Angle d'incidence $\theta$ .....                                        | 39 |
| 4.2.4.1                                                                | Irradiation solaire totale incidente .....                              | 41 |
| 4.3                                                                    | Température sol-air .....                                               | 42 |
| CHAPITRE 5 - FENÊTRES EXTÉRIEURES ET PLANCHER.....                     |                                                                         | 45 |
| 5.1                                                                    | Introduction.....                                                       | 45 |
| 5.2                                                                    | Transfert thermique au travers une fenêtre .....                        | 45 |
| 5.2.1                                                                  | Coefficient de déperdition thermique $U$ d'une fenêtre .....            | 47 |
| 5.2.2                                                                  | Implémentation du facteur $U$ .....                                     | 48 |
| 5.2.3                                                                  | Gains solaires au travers une fenêtre .....                             | 49 |
| 5.2.3.1                                                                | Gains par la portion vitrée.....                                        | 51 |
| 5.2.3.2                                                                | Gains par la portion opaque .....                                       | 54 |
| 5.2.3.3                                                                | Rideaux et stores .....                                                 | 55 |
| 5.3                                                                    | Plancher.....                                                           | 56 |
| 5.3.1                                                                  | Frontière extérieure du plancher .....                                  | 56 |
| 5.3.2                                                                  | Frontière intérieure du plancher.....                                   | 57 |
| CHAPITRE 6 - ÉCHANGES THERMIQUES AUX SURFACES INTERNES DES PAROIS..... |                                                                         | 58 |
| 6.1                                                                    | Échanges de grandes longueurs d'onde entre les parois d'une pièce ..... | 58 |
| 6.1.1                                                                  | Hypothèses.....                                                         | 59 |
| 6.1.2                                                                  | Méthode des radiosités.....                                             | 59 |
| 6.1.3                                                                  | Facteur de forme .....                                                  | 61 |
| 6.1.3.1                                                                | Introduction.....                                                       | 61 |
| 6.1.3.2                                                                | Présentation de la géométrie .....                                      | 62 |
| 6.1.3.3                                                                | Méthodes de calcul utilisées .....                                      | 63 |
| 6.1.3.4                                                                | Validation du calcul des facteurs de forme par le logiciel.....         | 69 |
| 6.2                                                                    | Convection à la surface interne.....                                    | 81 |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CHAPITRE 7 - GAINS INTERNES.....                                                                    | 84  |
| 7.1    Introduction.....                                                                            | 84  |
| 7.2    Sources de gains internes.....                                                               | 84  |
| 7.2.1    Occupants.....                                                                             | 85  |
| 7.2.2    Éclairage.....                                                                             | 87  |
| 7.2.3    Équipements.....                                                                           | 88  |
| 7.3    Profil d'occupation.....                                                                     | 89  |
| 7.4    Flux thermique dû aux gains internes.....                                                    | 92  |
| CHAPITRE 8 - VALIDATION DU LOGICIEL B5EES.....                                                      | 94  |
| 8.1    Introduction.....                                                                            | 94  |
| 8.2    Validations analytiques.....                                                                 | 94  |
| 8.2.1    Test 1 (TC1) : Conduction transitoire – une face adiabatique.....                          | 95  |
| 8.2.1.1    Cas d'une paroi à masse thermique légère.....                                            | 97  |
| 8.2.1.2    Cas d'une paroi à masse thermique lourde.....                                            | 98  |
| 8.2.2    Test 2 (TC2) : Conduction transitoire – température intérieure maintenue<br>constante..... | 99  |
| 8.2.2.1    Cas d'une paroi à masse thermique légère.....                                            | 100 |
| 8.2.2.2    Cas d'une paroi à masse thermique lourde.....                                            | 100 |
| 8.2.3    Test 3 (TC3) : Conduction transitoire – paroi multicouche.....                             | 104 |
| 8.2.4    Test 4 (IntLWRad) : Échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde.....                    | 108 |
| 8.2.5    Test 5 (IntHeatGain) : Gains internes.....                                                 | 110 |
| 8.3    Validations avec BESTEST.....                                                                | 114 |
| 8.3.1    Paramètres de base de BESTEST.....                                                         | 114 |
| 8.3.1.1    Climat, bâtiment et site.....                                                            | 114 |
| 8.3.1.2    Enveloppe du bâtiment.....                                                               | 115 |
| 8.3.2    Validation des gains solaires.....                                                         | 116 |
| 8.3.3    Études des cas.....                                                                        | 119 |
| 8.3.3.1    CAS 195.....                                                                             | 120 |

|                                                                                       |                                                                          |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.3.3.2                                                                               | CAS 270.....                                                             | 120 |
| 8.3.3.3                                                                               | CAS 600FF .....                                                          | 123 |
| 8.3.3.4                                                                               | CAS 900FF .....                                                          | 124 |
| 8.3.4                                                                                 | Conclusion .....                                                         | 129 |
|                                                                                       |                                                                          |     |
| CHAPITRE 9 - ORGANISATION GÉNÉRALE DU LOGICIEL B5EES ET<br>EXEMPLE D'UTILISATION..... |                                                                          | 130 |
| 9.1                                                                                   | Organisation générale des modules du programme.....                      | 130 |
| 9.1.1                                                                                 | Module "Conversion en cinq zones".....                                   | 130 |
| 9.1.2                                                                                 | Module "Surfaces opaques" .....                                          | 130 |
| 9.1.2.1                                                                               | Sous-module "Couches" .....                                              | 131 |
| 9.1.2.2                                                                               | Sous-module "Maillage" .....                                             | 131 |
| 9.1.2.3                                                                               | Sous-module "Nœuds" .....                                                | 131 |
| 9.1.3                                                                                 | Module "Gains solaires" .....                                            | 131 |
| 9.1.4                                                                                 | Module "Surfaces transparentes" .....                                    | 132 |
| 9.1.5                                                                                 | Module "Échanges GLO" .....                                              | 132 |
| 9.1.6                                                                                 | Module "Gains internes" .....                                            | 132 |
| 9.1.7                                                                                 | Module "Transfert thermique transitoire" .....                           | 133 |
| 9.2                                                                                   | Exemple d'utilisation de B5EES .....                                     | 135 |
| 9.2.1                                                                                 | Menu principal.....                                                      | 136 |
| 9.2.2                                                                                 | Étape 1 : Conversion du bâtiment en cinq zones .....                     | 137 |
| 9.2.3                                                                                 | Étape 2 : Saisie et traitements des parois opaques.....                  | 140 |
| 9.2.4                                                                                 | Étape 3 : Calculs des gains solaires sur les surfaces opaques externes . | 143 |
| 9.2.5                                                                                 | Étape 4 : Surfaces transparentes .....                                   | 145 |
| 9.2.6                                                                                 | Étape 5 : Échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde.....            | 146 |
| 9.2.7                                                                                 | Étape 6 : Gains internes .....                                           | 148 |
| 9.2.8                                                                                 | Étape 7 : Transfert thermique transitoire .....                          | 148 |
| 9.2.9                                                                                 | Branches.....                                                            | 151 |
| 9.3                                                                                   | Résultats.....                                                           | 152 |

|                  |                                                           |     |
|------------------|-----------------------------------------------------------|-----|
| 9.3.1            | Cas 1 : Températures intérieures des zones fixes .....    | 152 |
| 9.3.2            | Cas 2 : Températures intérieures des zones fluctuant..... | 158 |
| CONCLUSION.....  |                                                           | 160 |
| RÉFÉRENCES ..... |                                                           | 163 |
| ANNEXES .....    |                                                           | 168 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 3.1 : Propriétés thermophysiques des couches.....                                                                            | 25 |
| Tableau 3.2 : Résultats des propriétés du maillage.....                                                                              | 27 |
| Tableau 3.3 : Résultats des propriétés thermophysiques relatives aux nœuds .....                                                     | 30 |
| Tableau 5.1 : Définition des sigles désignatifs de vitrage de ASHRAE utilisé dans le logiciel.....                                   | 51 |
| Tableau 5.2 : Valeurs de $SHGC(\theta)$ et $SHGC_d$ pour les types de vitrage utilisés dans le logiciel.....                         | 53 |
| Tableau 5.3 : Coefficient de gains solaires opaque, surface totale et pourcentage de surface opaque pour les fenêtres standard. .... | 54 |
| Tableau 5.4 : Coefficient d'atténuation interne utilisé dans le logiciel .....                                                       | 55 |
| Tableau 6.1 : Évolution des valeurs des facteurs de forme pour dix itérations .....                                                  | 69 |
| Tableau 6.2 : Résultats issus du logiciel pour une pièce de 3m × 3m × 3m .....                                                       | 70 |
| Tableau 6.3 : Résultats des abaques pour une pièce de 3m × 3m × 3m.....                                                              | 70 |
| Tableau 6.4 : Résultats issus du logiciel pour une pièce de 6m × 10m × 4m .....                                                      | 71 |
| Tableau 6.5 : Résultats des abaques pour une pièce de 6m × 10m × 4m.....                                                             | 72 |
| Tableau 6.6 : Erreurs relatives entre les résultats pour une pièce de 6m × 10m × 4m ....                                             | 72 |
| Tableau 6.7 : Bilan radiatif pour une chambre (pièce 1) .....                                                                        | 77 |
| Tableau 6.8 : Bilan radiatif pour un corridor (pièce 1) .....                                                                        | 77 |
| Tableau 6.9 : Bilan radiatif pour un entrepôt (pièce 1).....                                                                         | 78 |
| Tableau 6.10 : Comparaison des charges exacte et approximative des bâtiments (pièce1) .....                                          | 78 |
| Tableau 6.11 : Bilan radiatif pour une chambre (pièce 2) .....                                                                       | 79 |
| Tableau 6.12 : Bilan radiatif pour un corridor (pièce 2) .....                                                                       | 79 |
| Tableau 6.13 : Bilan radiatif pour un entrepôt (pièce 2).....                                                                        | 80 |
| Tableau 6.14 : Comparaison des charges exacte et approximative des bâtiments (pièce 2) .....                                         | 80 |

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 7.1. : Activités des occupants.....                                                                                | 87  |
| Tableau 7.2 : Gains internes dus aux équipements (Komor, 1997).....                                                        | 88  |
| Tableau 8.1: Propriétés thermophysiques de la paroi légère .....                                                           | 96  |
| Tableau 8.2 : Propriétés thermophysiques de la paroi lourde.....                                                           | 96  |
| Tableau 8.3 : Résultats de ASHRAE et de B5EES pour le test IntLWRad.....                                                   | 109 |
| Tableau 8.4 : Matériaux de l'enveloppe, cas de masse thermique légère.....                                                 | 116 |
| Tableau 8.5 : Irradiations solaires sur les murs sud et ouest pour les journées du<br>5 mars et du 27 juillet à midi. .... | 119 |
| Tableau 8.6 : Coefficients de gains solaires des fenêtres BESTEST en fonction de<br>l'angle d'incidence.....               | 121 |
| Tableau 8.7 : Besoins énergétiques annuels pour les CAS 195 et 270.....                                                    | 123 |
| Tableau 8.8 : Matériaux de l'enveloppe, cas de masse thermique lourde. ....                                                | 124 |
| Tableau 8.9 : Températures annuelles maximale, minimales et moyenne de la pièce<br>pour les CAS 600FF et 900FF. ....       | 127 |
| Tableau 8.10 : Température de la pièce pour la journée du 4 janvier pour les CAS<br>600FF et 900FF.....                    | 128 |
| Tableau 9.1 : Données relatives aux gains internes .....                                                                   | 136 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 0.1 – Transformation d'un plan en un modèle simple de cinq zones.....                                                            | 1  |
| Figure 0.2 – Organigramme du programme .....                                                                                            | 4  |
| Figure 2.1 : Fenêtre de modélisation du plan du bâtiment.....                                                                           | 17 |
| Figure 2.2 : Schéma de la conversion géométrique du bâtiment. ....                                                                      | 17 |
| Figure 2.3 : Géométrie générée à l'aide des dimensions de la figure 2.1.....                                                            | 18 |
| Figure 2.4 : Fenêtre de composition des parois opaques du bâtiment .....                                                                | 20 |
| Figure 3.1 : Parois opaques d'un bâtiment.....                                                                                          | 21 |
| Figure 3.2 : Surface opaque constituée de cinq couches .....                                                                            | 24 |
| Figure 3.3 : Organisation du maillage.....                                                                                              | 25 |
| Figure 3.4. Distance associée à l'interface $e$ .....                                                                                   | 28 |
| Figure 3.5 : Nomenclature utilisée pour décrire le transfert thermique à travers les<br>surfaces opaques. ....                          | 32 |
| Figure 4.1 : Irradiations incidentes sur les murs et le toit.....                                                                       | 37 |
| Figure 4.2 : Angles relatifs à un plan quelconque .....                                                                                 | 39 |
| Figure 4.3: Concept de température sol-air.....                                                                                         | 42 |
| Figure 5.1 : Énergie passant au travers une fenêtre .....                                                                               | 47 |
| Figure 5.2 : Éléments principaux d'une fenêtre.....                                                                                     | 49 |
| Figure 5.3 : Gains thermiques solaires aux travers d'une fenêtre.....                                                                   | 50 |
| Figure 6.1 : Nomenclature des surfaces pour les calculs des facteurs de forme.....                                                      | 58 |
| Figure 6.2 : Réseau d'échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde entre la<br>surface $i$ et les autres surfaces de l'enceinte ..... | 59 |
| Figure 6.3 : Modèle du bâtiment élaboré par B5EES .....                                                                                 | 62 |
| Figure 6.4 : Enceinte composée de trois surfaces .....                                                                                  | 65 |
| Figure 6.5 : Pièce 1 utilisée pour la validation du calcul des facteurs de forme.....                                                   | 75 |
| Figure 6.6 : Pièce 2 utilisée pour la validation du calcul des facteurs de forme.....                                                   | 75 |

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 7.1 : Fenêtre du module gains internes.....                                                                                    | 85  |
| Figure 7.2 : Menus de sélection des activités des occupants et des densités<br>d'occupation des zones .....                           | 85  |
| Figure 7.3 : Menus de sélection des gains par éclairage et par les équipements .....                                                  | 89  |
| Figure 7.4 : Fenêtre de constitution du profil d'occupation.....                                                                      | 90  |
| Figure 7.5 : Profil d'occupation d'un bâtiment pour une semaine. ....                                                                 | 91  |
| Figure 7.6 : Gains internes d'une zone pour une semaine. ....                                                                         | 92  |
| Figure 8.1: Illustration du test 1 - Conduction transitoire – une face adiabatique.....                                               | 95  |
| Figure 8.2 : Réponse d'une paroi légère, dont la face interne est adiabatique, pour un<br>saut de température. ....                   | 97  |
| Figure 8.3 : Réponse d'une paroi lourde, dont la face interne est adiabatique, pour un<br>saut de température. ....                   | 98  |
| Figure 8.4 : Test 2 - Une enceinte à température intérieure fixe et dont une face est<br>sollicitée à la température extérieure ..... | 99  |
| Figure 8.5 : Variation de la température de la surface interne d'une paroi légère.....                                                | 100 |
| Figure 8.6 : Variation de la température de la surface externe d'une paroi légère .....                                               | 101 |
| Figure 8.7 : Variation des besoins de l'enceinte à paroi légère .....                                                                 | 101 |
| Figure 8.8 : Variation de la température de la surface interne d'une paroi lourde .....                                               | 102 |
| Figure 8.9 : Variation de la température de la surface externe d'une paroi lourde.....                                                | 103 |
| Figure 8.10 : Variation des besoins de l'enceinte à paroi lourde.....                                                                 | 103 |
| Figure 8.11 : Variation des besoins de l'enceinte à paroi légère .....                                                                | 105 |
| Figure 8.12 : Variation des besoins de l'enceinte à paroi lourde.....                                                                 | 105 |
| Figure 8.13 : Besoin horaire d'une zone en fonction du nombre de nœuds et<br>du schéma temporel .....                                 | 106 |
| Figure 8.14 : Variation des besoins de l'enceinte à paroi lourde, pas de temps<br>6 minutes.....                                      | 107 |
| Figure 8.15 : Indices utilisés dans le test 4 ; la surface 1 est la paroi extérieure<br>de la zone .....                              | 108 |
| Figure 8.16 : Enceinte adiabatique pour le test des gains internes. ....                                                              | 110 |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 8.17 : Variation de la température de surface interne de l'enceinte pour<br>un saut de gains internes. .... | 112 |
| Figure 8.18 : Besoins en climatisation de la zone.....                                                             | 112 |
| Figure 8.19 : Bâtiment de test, fenêtre au sud.....                                                                | 115 |
| Figure 8.20 : Irradiation solaire sur le mur sud pour la journée du 5 mars.....                                    | 117 |
| Figure 8.21 : Irradiation solaire sur le mur ouest pour la journée du 5 mars.....                                  | 117 |
| Figure 8.22: Irradiation solaire sur le mur sud pour la journée du 27 juillet. ....                                | 118 |
| Figure 8.23: Irradiation solaire sur le mur ouest pour la journée du 27 juillet. ....                              | 118 |
| Figure 8.24 : Besoin annuel en chauffage pour les CAS 195 et 270. ....                                             | 122 |
| Figure 8.25 : Besoin annuel en climatisation pour les CAS 195 et 270. ....                                         | 122 |
| Figure 8.26 : Température annuelle maximale des CAS 600FF et CAS900FF.....                                         | 125 |
| Figure 8.27 : Température annuelle minimale du CAS 600FF et CAS 900FF.....                                         | 125 |
| Figure 8.28 : Température moyenne annuelle des CAS 600FF et CAS 900FF.....                                         | 126 |
| Figure 8.29 : Température intérieure du CAS 600FF pour la journée du 4 janvier.....                                | 126 |
| Figure 8.30 : Température intérieure du CAS 900FF pour la journée du 4 janvier.....                                | 127 |
| Figure 9.1 : Organisation modulaire du programme B5EES.....                                                        | 134 |
| Figure 9.2 : Bâtiment étudié.....                                                                                  | 135 |
| Figure 9.3 : Menu principal de B5EES.....                                                                          | 137 |
| Figure 9.4 : Saisie des données pour la conversion du bâtiment en cinq zones. ....                                 | 138 |
| Figure 9.5 : Finalisation de conversion du bâtiment en cinq zones.....                                             | 139 |
| Figure 9.6 : Plan issu de la conversion de bâtiment.....                                                           | 139 |
| Figure 9.7 : Saisie des parois opaques .....                                                                       | 140 |
| Figure 9.8 : Maillage des parois opaques.....                                                                      | 141 |
| Figure 9.9 : Positions des noeuds dans le toit composé de E5-C13-B20-E3-E2 .....                                   | 141 |
| Figure 9.10 : Affectation des propriétés thermophysiques aux nœuds.....                                            | 142 |
| Figure 9.11 : Propriétés thermophysiques associées aux noeuds dans le toit<br>composé de E5-C13-B20-E3-E2.....     | 143 |
| Figure 9.12 : Fenêtre du module gains solaires sur les parois opaques .....                                        | 144 |
| Figure 9.13 : Gains solaires sur les surfaces opaques extérieures .....                                            | 144 |

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 9.14 : Saisie des fenêtres et calculs des gains solaires traversant les fenêtres....                  | 145 |
| Figure 9.15 : Gains solaires traversant les fenêtres.....                                                    | 146 |
| Figure 9.16 : Fenêtre du module « Échange GLO » .....                                                        | 147 |
| Figure 9.17 : Facteurs de forme entre les surfaces internes du bâtiment étudié .....                         | 147 |
| Figure 9.18 : Aires de toutes les surfaces internes.....                                                     | 147 |
| Figure 9.19 : Saisie des gains internes dans les cinq zones .....                                            | 148 |
| Figure 9.20 : Fenêtre du module « Transfert thermique transitoire » de B5EES .....                           | 149 |
| Figure 9.21 : Constitution du profil d'occupation .....                                                      | 150 |
| Figure 9.22 : Définition des autres paramètres .....                                                         | 150 |
| Figure 9.23 : Fenêtre des résultats .....                                                                    | 152 |
| Figure 9.24 : Besoins énergétiques des cinq zones du bâtiment étudié.....                                    | 153 |
| Figure 9.25 : Évolution des températures des surfaces internes de la zone<br>interne (Zone 5).....           | 155 |
| Figure 9.26 : Évolution des températures des surfaces internes de la zone<br>périphérique Sud (Zone 1) ..... | 156 |
| Figure 9.27 : Besoins énergétiques des zones.....                                                            | 157 |
| Figure 9.28 : Températures intérieures des zones.....                                                        | 159 |

**LISTE DES ANNEXES**

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ANNEXE A - EXEMPLE DE CALCULS RELATIFS AUX GAINS SOLAIRES AUX TRAVERS LES FENETRES ..... | 168 |
| ANNEXE B - RÉSULTATS DE LA CONVERSION EN CINQ D'UN BÂTIMENT                              | 170 |
| ANNEXE C - FORMAT DU FICHIER MÉTÉO DE B5EES .....                                        | 172 |

## INTRODUCTION

Cette étude a pour objectif de développer un logiciel simple et convivial permettant de déterminer les besoins horaires de chauffage et climatisation des bâtiments. Il est destiné aux ingénieurs et techniciens des bureaux d'études.

Par ailleurs, ce projet constitue une suite logique aux logiciels de calcul de systèmes de pompes à chaleur géothermiques développés par Bernier (1998-2001). Ainsi le logiciel développé ici pourra être facilement intégré aux autres logiciels développés par ce dernier.

Ce travail pose comme hypothèse fondamentale que tout bâtiment peut être modélisé convenablement en le divisant en cinq zones thermiquement semblables. Il s'agit donc, tel que montré à la figure 0.1, de transposer un bâtiment réel en un bâtiment équivalent contenant quatre zones périphériques et une zone interne.

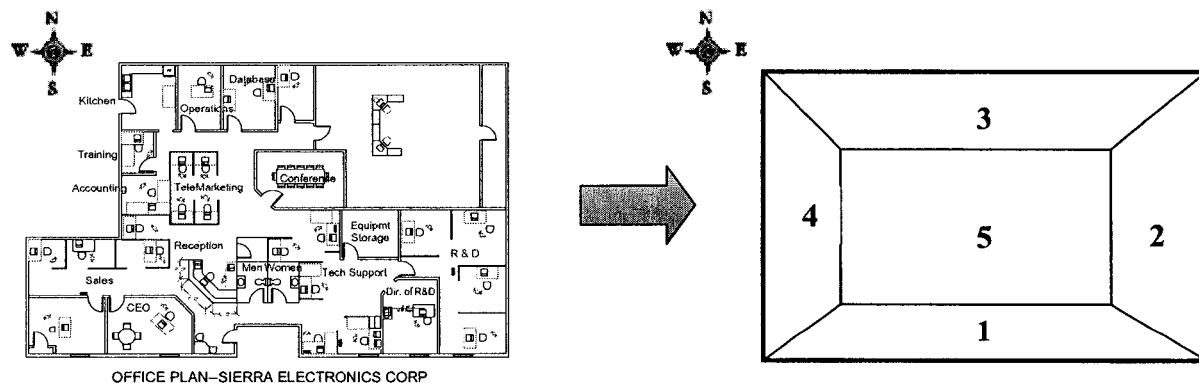


**Figure 0.1** – Transformation d'un plan en un modèle simple de cinq zones

L'utilisateur a à définir les quatre murs extérieurs, les quatre surfaces périphériques et la surface intérieure correspondants au bâtiment réel. Cette première étape reste cruciale car le choix effectué détermine les résultats finals obtenus.

La figure 0.2 présente, sous forme d'organigramme, les différents calculs compris à l'intérieur du logiciel. Outre la transformation du plan en cinq zones, le logiciel :

- effectue le traitement des données météo,
- calcule les transferts thermiques transitoires au travers des surfaces opaques,
- calcule les échanges par rayonnement de grandes longueurs d'onde entre les différentes parois internes,
- prends en compte les gains internes (humain, éclairage, équipements),
- calcule les gains solaires au travers les parois vitrées.

Les flux de données dans le logiciel sont représentés par les flèches de la figure 0.2. Remarquons, sur l'organigramme, les flèches à double sens qui indiquent que les deux modules qu'elles relient sont interdépendantes et nécessitent une exécution simultanée.

Ces calculs sont pour la plupart couplés et nécessitent donc un processus itératif de solution qui est réalisé ici en utilisant le solveur d'équation EES (Klein et Alvarado, 2002). Le logiciel est baptisé B5EES, ce qui se veut un acronyme pour Bâtiment de 5 zones résolu avec le solveur EES.

Ce mémoire comporte neuf chapitres. Le premier chapitre est consacré à une revue de la littérature. On y fait un inventaire des différents programmes de simulation énergétique les plus connus tout en relatant leurs forces et faiblesses. Le deuxième chapitre traite du transfert thermique transitoire au travers des surfaces opaques et des conditions de frontières sous-jacentes. Les échanges thermiques au niveau des surfaces externes sont détaillés au chapitre trois. Le chapitre cinq est consacré aux analyses des échanges

thermiques au niveau des fenêtres. Le chapitre six analyse les différents échanges thermiques entre les surfaces internes des zones. Les gains internes dans chacune des zones sont explicités dans le septième chapitre. La validation du logiciel est réservée au chapitre huit. Enfin, le dernier chapitre fait une description de l'implémentation des phénomènes pris en compte dans le logiciel. Quelques exemples de cas traités avec B5EES sont aussi rapportés dans ce chapitre.

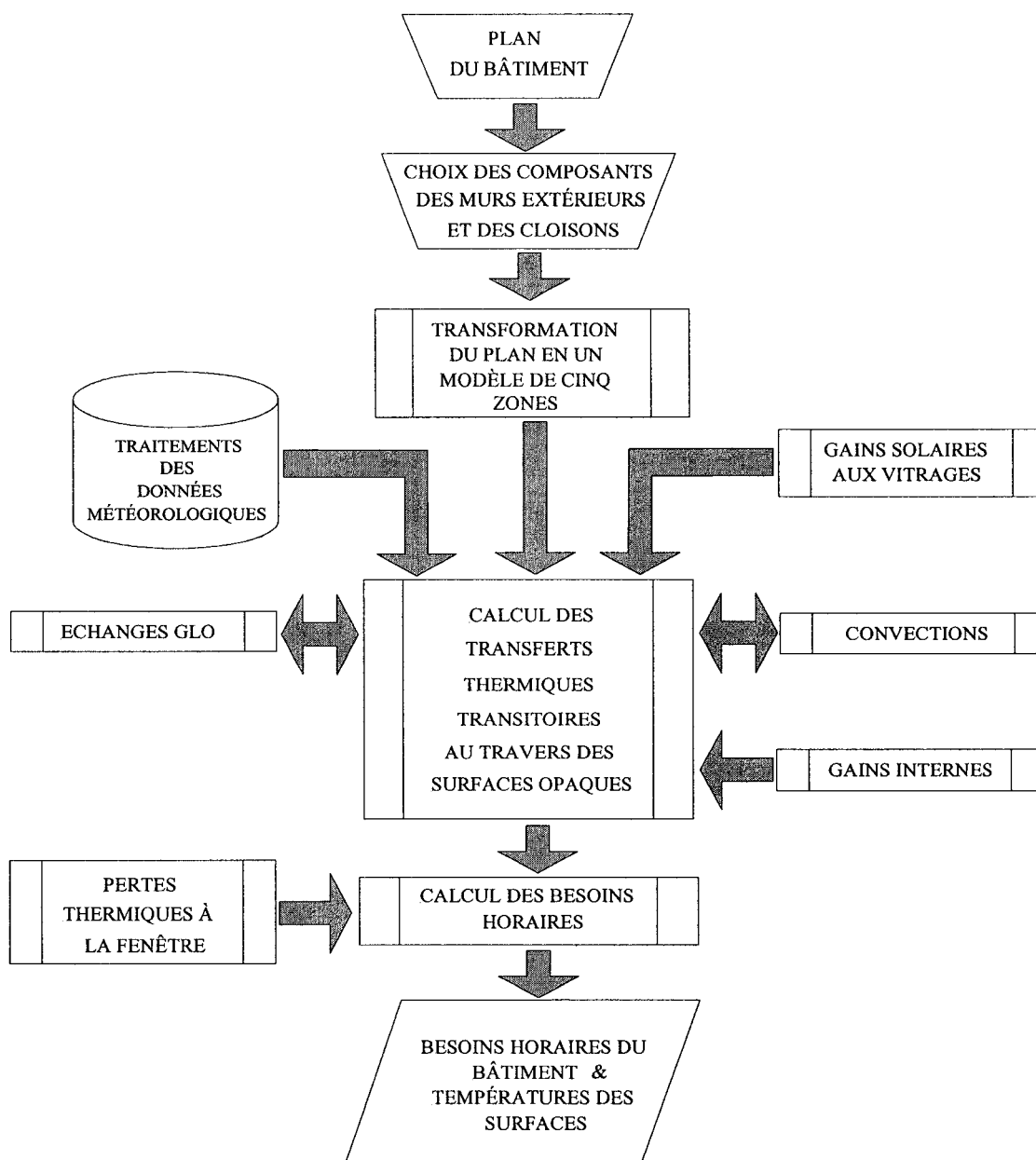


**Figure 0.2 – Organigramme du programme**

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LA LITTÉRATURE**

L'analyse du comportement thermique des bâtiments dans des conditions climatiques variables peut être entreprise à travers des expériences sur des bâtiments réels, ou en ayant recours aux programmes de simulation (Clarke 2001). Les outils de simulation permettent d'étudier paramétriquement l'influence de certains paramètres. Ce genre d'analyse pourrait être trop onéreuse à développer par des moyens expérimentaux (Nannei, 1999).

Depuis 1965, date à laquelle les premiers programmes de simulation furent utilisés, de nombreux programmes de simulations énergétiques de bâtiments ont été développés et sont continuellement mis à jour. Avec l'accroissement du nombre de logiciels, le nombre des utilisateurs a aussi augmenté. Ce chapitre fait un survol de quelques programmes de simulation énergétique de bâtiments maintenant disponibles commercialement.

La question fondamentale pour les programmes de simulation énergétique de bâtiment est à quel point ils prévoient l'utilisation réelle de l'énergie dans un bâtiment. En d'autres termes, à quel niveau de sophistication le programme doit-il être afin de réaliser l'évaluation raisonnable de cette énergie (Hong et Jiang, 1997).

#### **1.1 Anciens programmes de simulation**

Pour les bâtiments de grande envergure, les programmes de simulation les plus répandus et les plus utilisés dans le domaine public sont DOE-2 et BLAST. Ces deux programmes sont plutôt des programmes de calculs standard d'ingénieurs plutôt qu'un outil de conception (Kreider, 2001).

Les travaux afférents se sont concentrés plutôt aux développements d'algorithmes et aux analyses numériques qu'à l'interface utilisateur, bien que quelques interfaces graphiques soient développées par des revendeurs privés.

### 1.1.1 DOE-2

Utilisé aux États-Unis et dans plus de quarante pays, le programme DOE-2 (*Department of Energy*) est sans doute le programme le plus répandu et le plus connu actuellement. Mis sur le marché en 1979, la première version de DOE-2.0 est la version succédant DOE-1. Originellement commencé par le *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL), le *Argonne National Laboratory* (ANL) et le *Los Alamos National Laboratory* (LANL), le programme est principalement supporté par le département américain de l'énergie jusqu'en 1995.

DOE-2 est un programme informatique qui prédit heure par heure l'utilisation et le coût énergétique d'un bâtiment. Écrit en FORTRAN 77, le logiciel comporte différents sous-programmes soumis par plusieurs auteurs, et requiert à l'entrée les données suivantes : informations météorologiques horaires, description du bâtiment ainsi que ses équipements CVAC, et son régime d'utilisation. De plus, c'est un logiciel longuement débogué et validé avec des résultats thermiques et énergétiques mesurés et calculés sur des bâtiments réels (LBL, 2002). Par conséquent, il devient un outil très utilisé dans l'élaboration de normes d'efficacité énergétique des bâtiments aux États-Unis, notamment les normes ASHRAE-90.1 et ASHRAE-90.2 respectivement pour les bâtiments commerciaux et résidentiels.

Pour ses calculs, DOE-2 utilise la méthode des bilans thermiques sensibles et latents pour chacune des pièces. Les températures de consigne sont fixées par l'utilisateur. Les calculs des besoins énergétiques tiennent compte des conditions météo, du profil d'occupation des pièces, des charges causées par l'éclairage et les équipements, de

l'infiltration et des transferts thermiques aux travers les murs, les toits, et les fenêtres. Un autre sous-programme économique calcule le coût énergétique associé à l'opération du bâtiment. Ce dernier peut être un outil pour comparer les nouvelles conceptions ou déterminer l'économie réalisée suite à l'amélioration d'un bâtiment (Ndiaye, 2001). Finalement, DOE-2 possède d'importantes bibliothèques de données sur les matériaux généralement rencontrés dans le bâtiment.

Cependant, DOE-2 reste très complexe de par sa structure et son mode d'utilisation. Malgré quelques tentatives d'introduire des interfaces simplifiées (PowerDOE, eQuest, etc.), il n'est pas très convivial. Enfin, il se heurte actuellement à un problème de développement suite aux structures vétustes de ses programmes. Ainsi, en 1995, on a renoncé à poursuivre le développement de DOE-2 au profit d'un nouvel outil, appelé « EnergyPlus », mieux structuré et développé en un langage plus récent (FORTRAN 90).

### **1.1.2 BLAST**

BLAST, sigle de *Building Loads Analysis and System*, supporté officiellement par le ministère de la défense américaine (DOD), est un programme de simulation horaire. Il permet de simuler les bâtiments et les systèmes connexes pour fournir aux ingénieurs une estimation plus précise des besoins énergétiques des bâtiments. BLAST est basé sur la méthode fondamentale du bilan thermique pour les calculs des charges de chauffage et de climatisation (Yuill et Phillips, 1981).

La géométrie du bâtiment et ses caractéristiques thermiques sont introduites sous format texte dans BLAST. Des fichiers de données d'entrées lisibles et structurés peuvent être générés par le programme HBLC (sous Windows ®) ou BTEXT. Les résultats obtenus sont des rapports formatés, imprimés directement par BLAST.

Développé en FORTRAN 77, BLAST retrouve le même problème d'avancement que DOE-2 suite aux structures vétustes et entremêlées de ses codes.

Le format PC de BLAST a une interface Windows ainsi qu'une interface de texte structuré, mais il est loin d'être convivial. D'autre part, un haut niveau d'expertise est requis pour développer des systèmes et installations convenables.

### 1.1.3 TRNSYS

TRNSYS est un programme de simulation de systèmes thermiques avec une structure modulaire. Il a été développé il y a 25 ans par le professeur Klein du *Solar Energy Laboratory* de l'université du Wisconsin à Madison. Plusieurs chercheurs ont ensuite contribué au développement des différents modules constituant la bibliothèque actuelle de TRNSYS.

Chaque module modélise un phénomène physique spécifique et est associé à des paramètres d'entrée et de sortie. TRNSYS reconnaît un langage de description de système dans lequel l'utilisateur spécifie les pièces qui constituent le système et la façon dont elles sont connectées. La nature modulaire de TRNSYS donne au programme une bonne flexibilité, et facilite l'ajout de nouveaux modèles. TRNSYS est bien adapté aux analyses détaillées de systèmes dont le comportement dépend du temps.

Cependant TRNSYS, comme DOE et BLAST, nécessite une longue période d'apprentissage. De plus, il requiert un niveau de connaissance des systèmes élevé pour permettre de mieux gérer le parc de module interconnecté du système.

## **1.2 Nouvelles générations de programmes de simulation**

L'objectif des nouvelles générations de logiciels de simulation de bâtiment est d'encourager les architectes et ingénieurs à les utiliser dans toutes les phases de conception d'un bâtiment.

### **1.2.1 EnergyPlus**

Plusieurs programmes de simulation énergétique dans le monde atteignent leur maturité. Plusieurs d'entre eux utilisent encore des méthodes de simulation ou des codes datés des années 60.

C'est ainsi que, en 1995, le Département Américain de l'Énergie (DOE) décida de créer une nouvelle génération d'outils basée sur les meilleures capacités et caractéristiques de BLAST et de DOE-2, tout en y ajoutant de nouvelles capacités (Crawley, 2001).

Un des objectifs d'EnergyPlus est de créer une structure bien organisée et modulaire qui facilite l'ajout de modules et les liens avec d'autres programmes. Écrit avec le langage FORTRAN 90, le programme constitue une évolution progressive des anciens codes non structurés de BLAST et de DOE-2 vers un nouveau code modulaire.

Une des grandes priorités était une simulation intégrée pour une prédiction précise de la température et du confort. En effet, la simulation intégrée est le concept fondamental de EnergyPlus (Crawley et al., 2000). Les charges calculées (par le principe du bilan thermique) avec un pas de temps spécifié par l'utilisateur (15mn par défaut) sont passées dans le module de simulation des systèmes du bâtiment, pendant le même pas de temps. A son tour, le module de simulation de systèmes, avec un pas de temps variable (jusqu'à la seconde) calcule la réponse des installations de chauffage et de climatisation. Cette

réponse du module de simulation des systèmes sera transmise dans le prochain pas de temps du calcul de charge.

En utilisant la technique de simulation intégrée dans EnergyPlus, les plus sérieuses déficiences de BLAST et DOE-2, pour les simulations séquentielles peuvent être résolues, notamment la prédiction imprécise de la température de l'espace due à l'absence de feed-back des modules HVAC dans le calcul de charge.

Une prédiction précise de la température de la pièce est cruciale dans l'étude de l'efficacité énergétique et du confort. La simulation intégrée permet aussi aux usagers d'évaluer de nombreux processus que ni BLAST ni DOE-2 ne peuvent pas bien simuler. Parmi les plus importants il y a :

- contrôle réaliste des systèmes
- écoulement interzone de l'air
- système de chauffage/climatisation radiant
- adsorption et désorption d'humidité dans les éléments du bâtiment.

Bien que EnergyPlus se trouve actuellement parmi les outils de simulation de l'avenir, il reste toujours aussi complexe que ces prédécesseurs et requiert un haut niveau de connaissance de la part de l'utilisateur.

### **1.2.2 PAPTER**

Jusqu'à présent, nous avons cité des logiciels de haut niveau de complexité. Ces outils sont si complexes que beaucoup de concepteurs ne les utilisent pas. Reconnaisant cette problématique, certains organismes ont développé des logiciels simples et conviviaux.

Tel est le cas de PAPTER. (EDF, 2001). PAPTER est un outil de simulation horaire de bâtiment, fonctionnant sur PC sous l'environnement Windows®. C'est un logiciel destiné au calcul prévisionnel de la consommation énergétique d'un bâtiment du secteur tertiaire. Il est utilisé pour réaliser des études d'avant-projets de façon à comparer différents scénarios.

Le logiciel comporte une interface graphique 2-D permettant une description multizone sur plusieurs niveaux. Il possède des bases de données de murs, de cloisons et de vitrages standard, ainsi que des bâtiments et des scénarios types. Il dispose d'un catalogue de systèmes de chauffage/climatisation regroupant des systèmes conventionnels mais aussi des systèmes moins traditionnels comme les pompes à chaleur, les plafonds rayonnants, et les planchers chauffants, etc.

Les calculs sont faits en utilisant un bilan thermique horaire dans les zones, dont les températures sont fixées par les consignes. Il possède un générateur de scénario d'intermittence permettant de programmer les températures de consigne, l'occupation des zones, l'éclairage et les gains internes.

Les résultats obtenus sont récupérés par un module de calcul de coûts et d'optimisation tarifaire. Le logiciel calcule ainsi les consommations de chauffage/climatisation, d'éclairage, etc., et optimise la puissance souscrite et ressort la facture d'électricité sous forme d'un rapport de synthèse et de graphiques.

### **1.2.3 EE4**

Le Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments (CMNEB) de 1997 de Ressources naturelles Canada établit les normes de construction des éléments propres aux bâtiments sur l'efficacité énergétique.

Le logiciel EE4 a été conçu comme outil de vérification de la signature énergétique d'un bâtiment, et non comme outil de conception (CANMET, 2001). En conséquence, EE4 vérifie la performance énergétique selon les critères imposés par le Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments (CMNÉB) et le guide de Conformité des bâtiments par la méthode de performance (CMNÉB/SC, NRC 1999). Sur cette base, EE4 incorpore des hypothèses particulières au Code concernant l'infiltration d'air, les horaires d'utilisation, la performance des appareils de chauffage et de climatisation à charge pleine ou partielle, et les gains et pertes de chaleur, notamment avec le sol.

EE4 PEBC est conçu pour démontrer une conformité des bâtiments aux conditions requises par le Programme d'encouragement pour les bâtiments commerciaux (PEBC) pour une approche de performance. Le logiciel est destiné aux concepteurs de bâtiments désireux de déterminer la conformité d'une construction neuve, ou d'une rallonge à un bâtiment déjà construit, au Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments à partir de la méthode de performance.

Mais EE4 PEBC peut être aussi utilisé pour l'analyse de non-conformité énergétique d'un bâtiment et ainsi pour prédire sa consommation énergétique annuelle, et estimer l'impact des changements apportés au design du bâtiment. D'autre part, EE4 PEBC peut être utilisé pour déterminer les charges de chauffage et de climatisation d'un bâtiment aux fins de dimensionnement des équipements.

Le logiciel EE4 PEBC est constitué de trois composants principaux : une interface graphique, un processeur des règles du PEBD et un moteur de simulation.

L'interface graphique est conçue pour faciliter l'utilisation de l'outil par les ingénieurs et architectes. Il est développé en C++. Le processeur des règles PEBC assure que toutes les entrées requises sont spécifiées et que les plages admissibles sont respectées. Ensuite ce dernier assure que l'équipement de chauffage et de climatisation répond au

niveau maximum de demande en chauffage et en climatisation. Enfin, EE4 exécute des simulations annuelles du bâtiment proposé et du bâtiment de référence en utilisant le programme de simulation DOE-2.1E.

### **1.3 Simulation en fonction du type de régulation : *energy rate control* et *temperature rate control***

Les équipements CVAC d'un bâtiment peuvent être modélisés selon deux approches de régulation, communément appelées *energy rate control* et *temperature rate control* (Lemire, 1999).

#### **1.3.1 Approche de *energy rate control***

La première approche est mieux connue sous la dénomination de « bilan énergétique » (ou *energy rate control*). Sous cette approche, le programme détermine l'énergie requise pour maintenir les points de consigne de chauffage/climatisation fixés par l'utilisateur. À chaque pas de temps, il ressort une valeur des besoins énergétiques des bâtiments. Ensuite, connaissant le rendement des appareils de chauffage et climatisation, la consommation énergétique peut être évaluée pour un pas de temps voulu. Cette méthode est appropriée pour estimer les besoins en chauffage et climatisation horaires mais elle ne permet pas d'obtenir un calcul détaillé et précis de consommation énergétique puisque le bâtiment est découplé des équipements CVAC (Lemire, 1999).

En pratique, cette approche consiste à déterminer le temps d'opération de l'équipement de chauffage/climatisation durant un pas de temps donné pour une température de pièce fixe. Par exemple, si une pièce a une charge de climatisation de 10 kW pendant un pas de temps d'une heure et que l'appareil de climatisation a une capacité nominale de

20 kW et un COP de 4, alors le temps d'opération sera de 50% soit 30 minutes et la consommation énergétique sera de 2,5 kWh.

Les simulations employant le mode *energy rate control* permettent de découpler le calcul des besoins du reste de la simulation. Ainsi, il est possible d'évaluer les besoins avec un logiciel et ensuite d'évaluer la consommation énergétique des équipements avec un autre logiciel.

### 1.3.2 Approche de *temperature rate control*

Dans la méthode dite du *temperature rate control* ou du contrôle de niveau de température, c'est la température qui régie le fonctionnement des équipements mécaniques. Les calculs des besoins du bâtiment et de consommation énergétique du système sont donc couplés. Ceci nécessite une modélisation complète du système CVAC, et des organes de régulation. Les sorties du modèle de bâtiment sont utilisées par les modules simulant le système CVAC, qui fournissent, à leur tour, leurs sorties au module du bâtiment pour déterminer les nouvelles valeurs numériques de ses variables. La méthode du niveau de température permet une meilleure précision sur la prédiction de la consommation énergétique (Lemire, 1999).

Reprenons l'exemple de la première approche, mais cette fois-ci le COP de l'appareil de climatisation dépend de la température de la pièce. A une température de la pièce correspond à un besoin énergétique. Maintenant, pour assurer ce besoin, l'équipement de climatisation va consommer une quantité d'énergie dépendamment de son COP. Mais, comme nous avons dit au début, le COP va dépendre de la température de la pièce. Ainsi, comme la température de la pièce oscille en fonction de l'énergie retirée par l'appareil de climatisation, un processus itératif qui tient compte du modèle de régulation adoptée sera requis pour atteindre une estimation plus précise de la consommation énergétique.

Parmi, les programmes cités ci-haut, TRNSYS et EnergyPlus peuvent œuvrer avec l'approche de contrôle de niveau de température. DOE-2, BLAST et PAPTER utilisent l'approche de contrôle du niveau d'énergie. Quant à B5EES, il adopte dans le présent travail l'approche de contrôle de niveau d'énergie, vu que l'étude ne tient pas compte des équipements de chauffage/climatisation. Mais pour d'ultérieures analyses, il peut être facilement couplés avec des modules de systèmes pour atteindre l'approche de contrôle de niveau de température.

## CHAPITRE 2

### LE BÂTIMENT ET SON ENVELOPPE

#### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour convertir un bâtiment de géométrie quelconque en un bâtiment de cinq zones. De plus, on y décrit les mécanismes employés pour modéliser l'enveloppe.

#### 2.2 Conversion géométrique du bâtiment

Tel que mentionné dans l'introduction, on suppose que tout bâtiment peut être modélisé convenablement en le divisant en cinq zones thermiquement semblables. Pour effectuer cette opération le logiciel requiert dix paramètres pour assurer la conversion en un bâtiment de cinq zones. La figure 2.1 présente la fenêtre relative à cette étape dans le logiciel. En se référant à la figure 2.2, les dix paramètres sont :

- les longueurs du mur Sud,  $L1$ , du mur Est,  $L2$  et du mur Nord,  $L3$
- les orientations, par rapport à l'axe Ouest-Est (l'horizontal du plan), du mur Sud,  $\chi_1$ , du mur Est,  $\chi_2$  et du mur Nord,  $\chi_3$
- les aires de quatre surfaces périphériques  $SP1$ ,  $SP2$ ,  $SP3$  et  $SP4$ .
- la hauteur des murs.

EES Professional Version: PLAN-ETAPE1.EES - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Étape 1

CONVERSION DU BÂTIMENT EN CINQ ZONES

| 1ère tranche       |         |         |          |           |
|--------------------|---------|---------|----------|-----------|
|                    | mur Sud | mur Est | mur Nord | mur Ouest |
| Longueur [m]       | 70      | 70      | 70       | -         |
| Angle [°]          | 5       | 100     | 10       | -         |
| Surface péri. [m²] | 325     | 325     | 325      | 325       |

Hauteur du niveau = 3.33 [m]

**Figure 2.1 :** Fenêtre de modélisation du plan du bâtiment

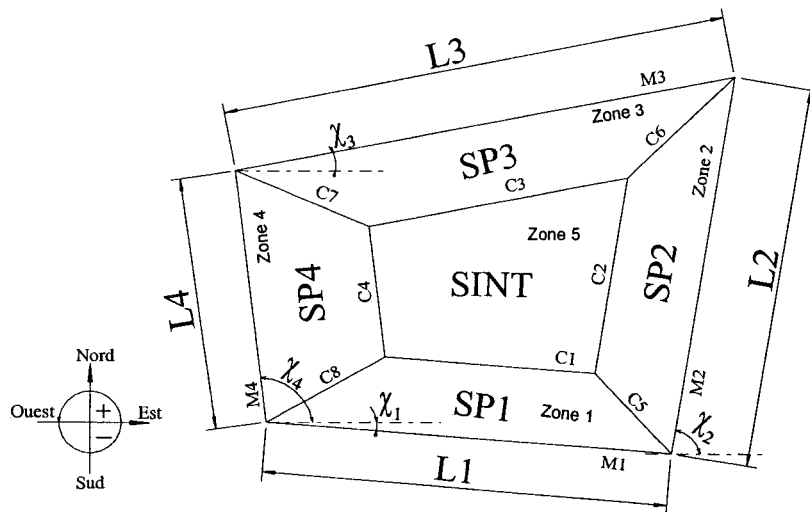


**Figure 2.2 :** Schéma de la conversion géométrique du bâtiment

Les surfaces périphériques sont disposées pour avoir une forme trapézoïdale, rendant ainsi la surface interne quadrilatère. Ainsi, à partir des dimensions saisies ci-dessus, les valeurs des autres paramètres sont obtenues par les simples lois des trapèzes, notamment l'aire de la surface interne, la longueur et l'orientation du mur Ouest et les dimensions des cloisons C1 à C8.

B5EES fait cette conversion en deux étapes. La première étape détermine la dimension et l'orientation du mur ouest, et la seconde calcule l'aire de la surface interne et les longueurs de chacune des tranches de cloisonnement, ainsi que leurs surfaces.

Le bouton « Voir le plan » permet de générer la géométrie du bâtiment modélisé. La figure 2.3 montre la géométrie générée pour les dimensions présentées à la figure 2.1.

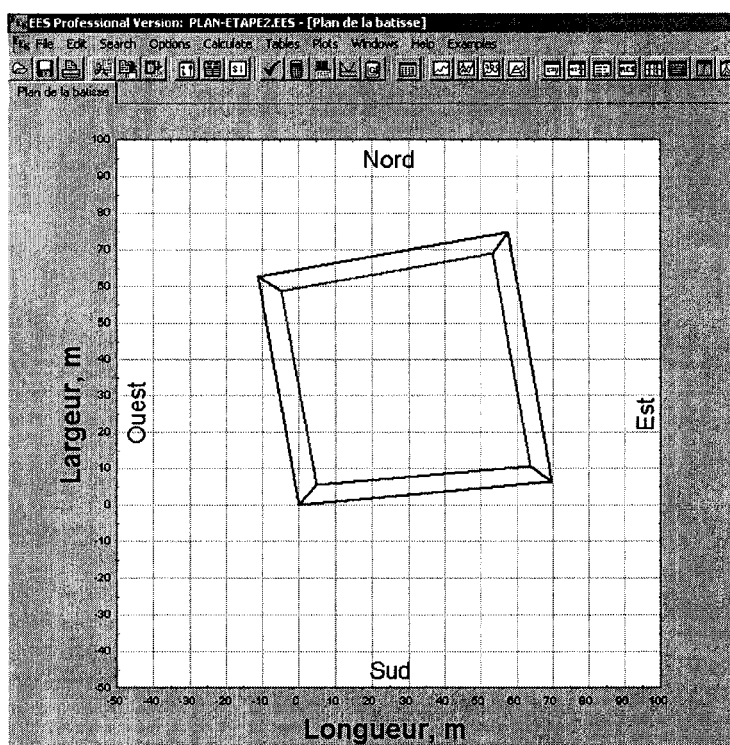


**Figure 2.3 :** Géométrie générée à l'aide des dimensions de la figure 2.1

Cette première version de B5EES ne prévoit que l'étude d'un étage. Ainsi, la simulation peut seulement s'effectuer par niveau ; les interactions entre les niveaux se limitent à une température adjacente constante. Les cas des mezzanines ou des murs de hauteurs différentes ne peuvent pas être simulés convenablement avec B5EES. Les résultats relatifs aux figures 2.3 sont explicités à l'annexe B.

Mentionnons que les surfaces des murs extérieurs sont mises à jour lors du traitement des fenêtres extérieures. En effet, la surface réelle d'un mur sera son aire, enlevée de la surface de la fenêtre qu'elle comporte.

### **2.3 Composition des couches de l'enveloppe du bâtiment**

La figure 2.4 montre le menu de saisies de données dans B5EES. Ce menu concerne les murs mais des menus semblables sont présents pour le plancher, le plafond, et les cloisons. Tel que montré sur cette figure, les surfaces opaques peuvent contenir jusqu'à cinq matériaux différents. Les couches standard de ASHRAE (1997) sont proposées dans les menus tombants pour faciliter la saisie des propriétés thermophysiques de chacune des couches. Le cas échéant, la sélection de l'item « autre » active les cases pour saisir les propriétés thermophysiques d'une couche identifiée par l'utilisateur.

Le programme suggère de poursuivre étape par étape la constitution des murs extérieurs, puis du plafond, du plancher et des cloisons. Après avoir constitué une paroi, il est fortement recommandé de la sauvegarder avec le bouton « Save » pour des utilisations ultérieures en la rappelant, cette fois-ci, avec le bouton « Load ». La résistance thermique de la paroi est évaluée instantanément au fur et à mesure qu'une couche est sélectionnée. La validation de la constitution d'une paroi est finalisée en appuyant sur le bouton « Accepter » qui permet de stocker les propriétés thermophysiques de la paroi ainsi formée dans un fichier portant l'identité de la paroi.

Comme les modules en aval sont prévus pour traiter une paroi de cinq couches, quelques rajouts dans le module couche sont nécessaires pour permettent de traiter une paroi de moins de cinq couches. Pour se faire, si un mur ne comporte que 4 couches, la quatrième couche est scindée en deux couches d'épaisseurs égales pour constituer une quatrième et cinquième couche. De la même manière, pour une paroi de trois couches, la troisième couche est fractionnée en trois. Finalement, l'utilisateur doit sélectionner

« aucune » dans les menus tombants pour la (les) couche(s) manquante(s). Cette approche mène parfois à l'obtention de couches très fine quand la dernière couche est fractionnée. Il est alors recommandé dans certains cas de choisir la sélection « autre » et répartir les couches épaisses.

EES Professional Version: PAROIS OPAQUES.EES - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

LES SURFACES OPAQUES ? Aide

Étape 2 1ère tranche : Composition des parois

1 - Sélectionner la paroi à composer MUR

2 - Composer la paroi ou chargée une paroi existante ici Load

| NOUVELLE PAROI             |  |                            |  |                            |  |                        |  |                        |  |
|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|--|------------------------|--|------------------------|--|
| Couche 1                   |  | Couche 2                   |  | Couche 3                   |  | Couche 4               |  | Couche 5               |  |
| AUTRE                      |  | B7                         |  | C20                        |  | AUCUNE                 |  | AUCUNE                 |  |
| 20 [mm]                    |  | 25 [mm]                    |  | 300 [mm]                   |  | 0 [mm]                 |  | 0 [mm]                 |  |
| 1 [W/m K]                  |  | 0.121 [W/m K]              |  | 0.875 [W/m K]              |  | 0 [W/m K]              |  | 0 [W/m K]              |  |
| 2002 [kg/m <sup>3</sup> ]  |  | 203 [kg/m <sup>3</sup> ]   |  | 247 [kg/m <sup>3</sup> ]   |  | 0 [kg/m <sup>3</sup> ] |  | 0 [kg/m <sup>3</sup> ] |  |
| 0.02 [m <sup>2</sup> K/W]  |  | 2.51 [m <sup>2</sup> K/W]  |  | 0.34 [m <sup>2</sup> K/W]  |  | 0 [m <sup>2</sup> K/W] |  | 0 [m <sup>2</sup> K/W] |  |
| 0.02 [m <sup>2</sup> K/W]  |  | 1.78 [m <sup>2</sup> K/W]  |  | 0.461 [m <sup>2</sup> K/W] |  | 0 [m <sup>2</sup> K/W] |  | 0 [m <sup>2</sup> K/W] |  |
| 40.04 [kg/m <sup>2</sup> ] |  | 15.13 [kg/m <sup>2</sup> ] |  | 273.3 [kg/m <sup>2</sup> ] |  | 0 [kg/m <sup>2</sup> ] |  | 0 [kg/m <sup>2</sup> ] |  |
| 20                         |  | 25                         |  | 100                        |  | 100                    |  | 100                    |  |

EXTERIEUR INTERIEUR

1: MY LAYER  
2: 25 MM WOOD  
2: 300 MM HIGH DENSITY CONCRETE BLOCK (FILLED)  
4: -  
5: -

R<sub>TOTAL</sub> = 2.231 [m<sup>2</sup> K/W]  
U = 0.4482 [W/m<sup>2</sup> K]

3 - Valider la cette paroi Valider LES MURS EXTÉRIEURS sont validé(e)s quand je vire au rouge

4 - Enregistrer cette paroi pour une utilisation ultérieure Save

5 - Revenir à 1 pour composer les autres parois

6 - Quand les quatres parois sont terminées, continuer ici MAILLAGE >>

Copyright 2002 - Duo Randriamantsojato

**Figure 2.4 :** Fenêtre de composition des parois opaques du bâtiment

Quand toutes les parois sont constituées, le bouton « Maillage » permet continuer les traitements relatifs aux surfaces opaques qui seront détaillés dans le chapitre 3.

## CHAPITRE 3

### TRANSFERT THERMIQUE TRANSITOIRE AU TRAVERS DES SURFACES OPAQUES

#### 3.1 Introduction

Ce chapitre traite du transfert thermique transitoire au travers des surfaces opaques (murs externes, cloisons, plancher et toit). La figure suivante représente les différents lieux où se manifestent les transferts thermiques transitoires au travers les surfaces opaques d'un bâtiment.

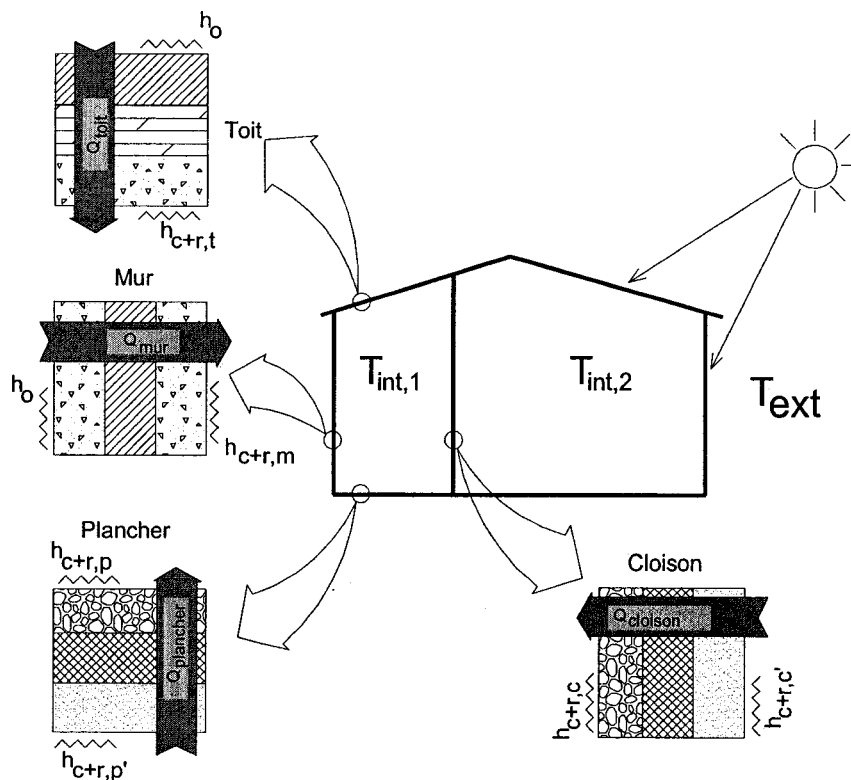


**Figure 3.1 : Parois opaques d'un bâtiment**

Pour une surface opaque, les phénomènes suivants sont présents :

- convection interne et externe : un échange thermique par convection s’effectue entre les surfaces externes et l’air ambiant extérieur ainsi qu’entre l’air intérieur et les surfaces qui l’enveloppent ;
- conduction : au travers l’enveloppe de conductivité  $k$  et de masse thermique  $M$  se produit un transfert de chaleur par conduction ;
- rayonnement solaire incident : les surfaces extérieurs reçoivent éventuellement du rayonnement solaire variant en angle et en intensité avec le temps ;
- rayonnement de grandes longueurs d’onde : des échanges par rayonnement de grandes longueurs d’onde peuvent exister suite aux différences entre la températures des surfaces internes.

Sur la Figure 3.1, les échanges convectifs et radiatifs sont représentés par les coefficients de film  $h_{c+r,x}$  (où l’indice  $x$  peut être soit le mur,  $m$ , soit le plancher,  $p$ , soit le cloison,  $c$ ). Le coefficient  $h_0$  exprime les échanges convectifs extérieurs associés aux échanges de grandes longueurs d’onde avec le milieu environnant et aux gains solaires. Les transferts thermiques aux travers les surfaces opaques sont représentés par les flèches portant  $Q$ .

### 3.2 Hypothèses

L’approche la plus utilisée pour solutionner ce problème est de traiter le transfert de chaleur au travers un matériau opaque comme un problème de conduction simple unidimensionnel avec des propriétés thermophysiques constantes (Beausoleil-Morrison,

2000). Ce niveau de simplification est standard dans le domaine de la simulation énergétique des bâtiments.

Les hypothèses suivantes sont utilisées pour obtenir la distribution temporelle de la température dans la paroi :

- Chaque couche est homogène
- Les faces des couches sont isothermes
- La stratification thermique de l'air intérieur est négligée
- L'air est pris comme étant un milieu parfaitement transparent au fin des calculs de rayonnement
- Le transfert d'humidité est négligé
- La résistance de contact entre deux couches adjacentes est nulle.

### 3.3 Équation gouvernante

Le problème consiste à déterminer le transfert thermique transitoire dans un mur contenant un maximum de cinq couches (Figure 3.2) soumis d'une part à un coefficient d'échange externe,  $h_0$  et d'autre part à un coefficient d'échange interne,  $h_1$ . L'évolution thermique à l'intérieur du mur s'obtient à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.1)$$

où  $T$  représente la température (°C),  $\rho$ , la masse volumique (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$  la chaleur spécifique de la couche (J/kg.K),  $t$  est le temps (s) et  $x$  est la position des nœuds dans le mur (m).

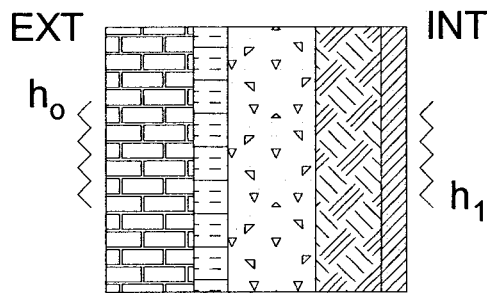


**Figure 3.2 :** Une surface opaque constituée de cinq couches

### 3.4 Résolution de l'équation de conduction

Ce problème est résolu en utilisant l'approche des volumes de contrôle proposée par Patankar (1980). L'approche adoptée consiste à choisir un profil de variation spatiale linéaire de la température dans le volume de contrôle. Quant à la variation temporelle de la température, elle est supposée constante tout au long d'un intervalle de temps afin d'obtenir un schéma complètement implicite (Patanekar, 1980).

#### 3.4.1 Maillage des surfaces opaques

Le mur est maillé de façon à avoir trois nœuds dans chacune de ses couches constituantes.

Les nœuds sont arrangés de façon à obtenir des volumes de contrôle homogènes (dans une même couche). Le maillage est alors effectué pour que les interfaces soient des limites de volumes de contrôle. Les couches périphériques posséderont deux et demi volumes de contrôle.



L'épaisseur du volume de contrôle dans les couches périphériques vaut  $L_i/2,5$  (il y a 2,5 volume de contrôles dans les couches périphériques). L'épaisseur d'un volume de contrôle dans la couche 1 (couches périphérique) sera ainsi  $25 / 2,5 = 10$  mm (il y a 2,5 volume de contrôles dans la couche 1). L'épaisseur  $\Delta x_1$  du volume contrôle autour du nœud 1 (nœud périphérique) vaut la moitié de cette valeur (demi volume de contrôle), soit 5mm, alors que ceux des nœuds 2 et 3 vaut 10mm.

Pour les cas des couches internes, l'épaisseur des volumes de contrôle vaut  $L_i/3$  (il y a 3 volumes de contrôles dans les couches internes). On vérifie, pour le nœud 4, l'épaisseur  $\Delta x_4 = L_2 / 3 = 125 / 3 = 41,67$  mm,

De plus,

$$\Delta x_4 = \Delta x_5 = \Delta x_6 = 41,67 \text{ mm ;}$$

$$\Delta x_7 = \Delta x_8 = \Delta x_9 = 66,67 \text{ mm ;}$$

$$\Delta x_{10} = \Delta x_{11} = \Delta x_{12} = 41,67 \text{ mm et}$$

$$\Delta x_{13} = \Delta x_{14} = 2 \Delta x_{15} = 4,80 \text{ mm}$$

La distance entre les nœuds 3 et 4 (cas d'un nœud dans une couche périphérique et un autre dans une couche intérieure) est obtenue par :

$$\delta x_4 = (L_1/2,5 + L_2/3) / 2 = (25/2,5 + 125/3) / 2 = 25,83 \text{ mm}$$

$$\text{Et } \delta x_{13} = 23,23 \text{ mm}$$

La distance entre les nœuds 7 et 8 (cas de deux nœuds dans deux couches intérieures) est calculée par :

$$\delta x_7 = (L_2/3 + L_3/3) / 2 = (125/3 + 200/3) / 2 = 54,17 \text{ mm}$$

De la même manière,  $\delta x_{10} = 54,17 \text{ mm}$

**Tableau 3.2 : Résultats des propriétés du maillage**

| Nœud | $X_i$ ,<br>m | $\Delta x_i$ ,<br>m | $\delta x_i$ ,<br>m |
|------|--------------|---------------------|---------------------|
| 1    | 0            | 0,005               | 0                   |
| 2    | 0,01         | 0,01                | 0,01                |
| 3    | 0,02         | 0,01                | 0,01                |
| 4    | 0,04583      | 0,04167             | <b>0,02583</b>      |
| 5    | 0,0875       | 0,04167             | 0,04167             |
| 6    | 0,1292       | 0,04167             | 0,04167             |
| 7    | 0,1833       | 0,06667             | <b>0,05417</b>      |
| 8    | 0,25         | 0,06667             | 0,06667             |
| 9    | 0,3167       | 0,06667             | 0,06667             |
| 10   | 0,3708       | 0,04167             | <b>0,05417</b>      |
| 11   | 0,4125       | 0,04167             | 0,04167             |
| 12   | 0,4542       | 0,04167             | 0,04167             |
| 13   | 0,4774       | 0,0048              | <b>0,02323</b>      |
| 14   | 0,4822       | 0,0048              | 0,0048              |
| 15   | 0,487        | 0,0024              | 0,0048              |

### 3.4.2 Propriétés physiques associées aux nœuds des volumes de contrôle

En plus des termes de distances correspondant aux positions des nœuds et aux épaisseurs des volumes de contrôle, comme dans le Tableau 3.2, les propriétés thermophysiques sont aussi affectées à chacun des 15 nœuds d'une paroi.

Ainsi, la température du nœud de chaque volume de contrôle est assignée au volume de contrôle tout entier. Il en est de même pour la masse volumique et la chaleur massique, en supposant l'homogénéité de chaque volume de contrôle.

D'autre part, la conductivité effective  $\gamma_i$  est la conductivité thermique entre le nœud  $i$  et le nœud  $i+1$ . Il est évident que  $\gamma_i = \lambda_i$  (conductivité thermique de la couche où se trouve le nœud  $i$ ) si les deux nœuds successifs sont dans une même couche. Dans le cas contraire, la présence d'une interface nécessite un traitement spécial.

### 3.4.2.1 Cas des interfaces

À l'interface, la conductivité thermique est évaluée à l'aide de la relation suivante tel que recommandée par Patankar (1980) :

$$\gamma = \left( \frac{1-f_e}{\lambda_p} + \frac{f_e}{\lambda_E} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

où le facteur d'interpolation  $f_e$  est le rapport de distance

$$f_e = \frac{(\delta x)_{e+}}{(\delta x)_e} \quad (3.3)$$

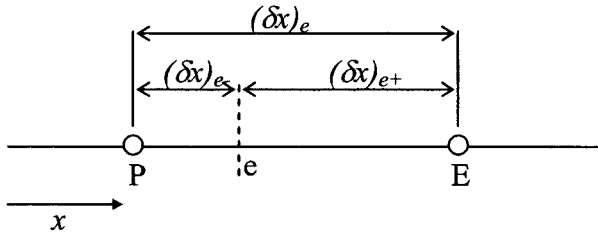


**Figure 3.4.** Distance associée à l'interface  $e$

On remarque que quand la surface  $e$  se trouve au milieu des points P et E, la conductivité  $\gamma$  est la moyenne harmonique de conductivités thermiques  $\lambda_P$  et  $\lambda_E$ . Cette approche de conductivité thermique équivalente aux interfaces permet de considérer les changements brusques de la valeur de  $k$  même avec de maillages grossiers près de l'interface (Patankar, 1980).

### 3.4.2.2 Exemple

Prenons toujours le cas d'un mur A1-B14-C12-B14-E2, dont les propriétés sont présentées au Tableau 3.1.

Les valeurs des paramètres  $C_p$  et  $\rho$  sont normalement identiques pour les trois nœuds dans chacune des couches (Tableau 3.3). Les conductivités effectives,  $\gamma$ , au niveau des faces peuvent être vérifiées par l'équation (3.2). On trouve qu'elles sont bien égales à  $\lambda$ , à l'intérieur d'une couche, et ont des valeurs différentes au niveau des interfaces.

Vérifions le cas de l'interface A1-B14

$$f_{e3} = (L_2/3) / (L_2/3 + L_1/2,5) = (125/3) / (125/3 + 25/2,5) = 0,806$$

$$\gamma_3 = (1 - 0,806)/0,692 + 0,806/0,043)^{-1} = 19,034^{-1} = 0,05254 \text{ W/m K}$$

**Tableau 3.3 : Résultats des propriétés thermophysiques relatives aux nœuds**

| Nœud | $C_p$ ,<br>kJ/kg.K | $\rho$ ,<br>kg/m <sup>3</sup> | $\lambda$ ,<br>W/m.K | $\gamma$<br>W/m.K |
|------|--------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1    | 0,84               | 1858                          | 0,692                | 0,692             |
| 2    | 0,84               | 1858                          | 0,692                | 0,692             |
| 3    | 0,84               | 1858                          | 0,692                | <b>0,05254</b>    |
| 4    | 0,84               | 91                            | 0,043                | 0,043             |
| 5    | 0,84               | 91                            | 0,043                | 0,043             |
| 6    | 0,84               | 91                            | 0,043                | 0,09978           |
| 7    | 0,84               | 1121                          | 0,571                | 0,571             |
| 8    | 0,84               | 1121                          | 0,571                | 0,571             |
| 9    | 0,84               | 1121                          | 0,571                | 0,09978           |
| 10   | 0,84               | 91                            | 0,043                | 0,043             |
| 11   | 0,84               | 91                            | 0,043                | 0,043             |
| 12   | 0,84               | 91                            | 0,043                | 0,04779           |
| 13   | 1,67               | 881                           | 1,436                | 1,436             |
| 14   | 1,67               | 881                           | 1,436                | 1,436             |
| 15   | 1,67               | 881                           | 1,436                | 1,436             |

Maintenant que nous avons effectué convenablement le maillage des parois opaques, nous pouvons écrire les équations discrétisées de transfert au niveau de chacun des nœuds.

### 3.4.3 Cas des noeuds internes

En se référant à la figure 3.3, l'équation discrétisée pour les nœuds internes est donnée par :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_O T_O + b \quad (3.4)$$

où

$$a_p = a_E + a_O + a_p^0 \quad (3.5)$$

$$a_E = \frac{k_e}{\delta x_e}, \quad a_O = \frac{k_o}{\delta x_o} \quad (3.6)$$

$$\text{et } a_p^0 = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t}, \quad b = a_p^0 T_p^0 \quad (3.7)$$

où  $\Delta x$  est la largeur du volume de contrôle,  $T_p^0$  est la température au temps précédent,  $k_e$  et  $k_o$  sont les conductivités des interfaces, et  $\Delta t$  est le pas de temps.

L'hypothèse d'homogénéité de chacune des couches implique que la masse volumique au nœud de chaque volume de contrôle est assignée au volume de contrôle tout entier. Il en est de même pour la chaleur massique et la conductivité thermique.

#### 3.4.4 Cas des noeuds aux frontières

Un maillage du « type A » (Patankar, 1980) a été utilisé. Ceci implique l'existence de demi volumes de contrôle aux extrémités. Ces noeuds reçoivent un traitement particulier.

Ainsi l'équation pour le point de frontière B est donnée par :

$$a_B T_B = a_I T_I + a_O T_O + b \quad (3.8)$$

où

$$a_B = a_I + a_B^0 \quad (3.9)$$

$$a_I = \frac{k_i}{\delta x_i} \quad (3.10)$$

$$\text{et } a_B^0 = \frac{\rho C_p (\Delta x / 2)}{\Delta t}, \quad b = a_B^0 T_B^0 + q_B \quad (3.11)$$

$q_B$  représente la somme de toutes les différentes sollicitations thermiques présentes au niveau des frontières. Le paragraphe qui suit explicite brièvement ces derniers phénomènes.

### 3.4.5 Conditions de frontière

En plus des gains/pertes par convection avec l'air interne, il existe, tel que montré aux figures suivantes, d'autres conditions frontières qui influencent le transfert thermique transitoire au travers des surfaces opaques.

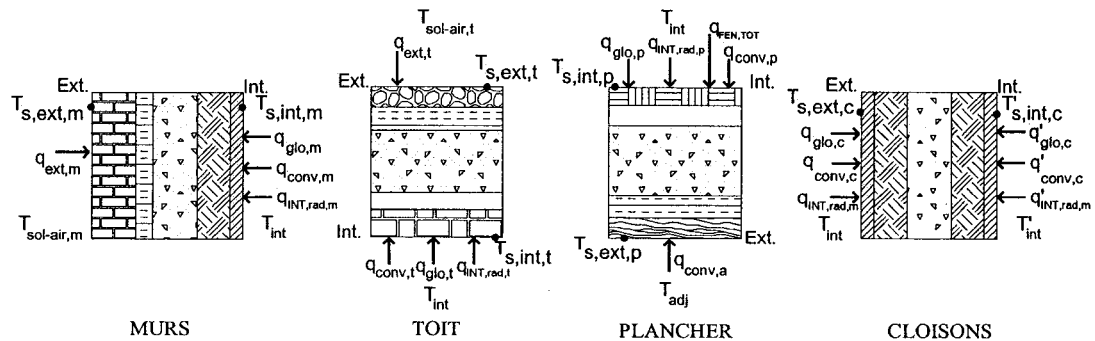


**Figure 3.5 :** Nomenclature utilisée pour décrire le transfert thermique à travers les surfaces opaques

### 3.4.5.1 Gains solaires externes

En référence avec la Figure 3.5, le transfert thermique au niveau des surfaces externes, quantifié par le paramètre  $q_{ext,i}$ , est donné par l'équation suivante :

$$q_{ext,i} = h_e (T_{sol-air,i} - T_{s-ext,i}) \quad (3.12)$$

où

- $T_{sol-air}$  est la température sol-air de la surface  $i$  (ASHRAE, 1997) ;
- $h_e$  est le coefficient de film extérieur, qui tient compte de la convection avec l'air ambiant, du rayonnement solaire incident et des échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde entre les surfaces extérieures et leurs environs ;
- $T_{s-ext,i}$  est la température superficielle extérieure de la surface  $i$ .

Le coefficient  $h_e$  est supposé constant et égal à 16,94 W/m<sup>2</sup>-K (ASHRAE, 1997).

### 3.4.5.2 Gains solaires à travers les surfaces transparentes

Une partie du rayonnement solaire traverse la fenêtre, et devient un gain thermique à l'intérieur. Ce gain, dénoté par  $q_{FEN,TOT}$  est supposé être reçue et absorbée entièrement par la surface interne du plancher. La section 5.2.3 montre la méthodologie requise pour obtenir  $q_{FEN,TOT}$ .

### 3.4.5.3 Échanges de grandes longueurs d'ondes (GLO)

La différence de température entre les surfaces internes engendre un transfert thermique radiatif de grandes longueurs d'onde entre ces dernières. Pour une surface  $i$ , ce dernier est caractérisé par le taux net d'échange GLO  $q_{GLO,i}$ . Ces valeurs sont déterminées à la section 6.1.

### 3.4.5.4 Gains internes

Une partie des gains internes est reçue par les surfaces internes sous forme d'énergie radiante de grandes longueurs d'onde  $q_{INT,rad}$  alors que la portion convective  $q_{INT,conv}$  restante contribue immédiatement à la charge de chauffage/climatisation.

$$q_{INT,rad} = (1 - F_{conv}) q_{INT} \quad (3.13)$$

où  $F_{conv}$  est la fraction convective des gains internes et  $q_{INT}$  la somme des gains provenant des sources thermiques à l'intérieur d'une zone. Cette notion est détaillée au chapitre 7.

### 3.4.5.5 Convection interne

Le transfert de chaleur entre les surfaces internes des parois et l'air à l'intérieur d'une zone se fait exclusivement par convection. Ce phénomène est régi par l'équation :

$$q_{conv,i} = h_{int,i} (T_{s-int,i} - T_{int}) \quad (3.14)$$

La section 6.2 explicite la façon dont les convections internes sont implémentées dans B5EES.

#### **3.4.5.6 Résumé**

En résumé, l'équation (3.1) est l'équation gouvernante à résoudre. Les équations (3.4) et (3.8) sont les équations discrétisées qui en découlent en utilisant la méthode des différences finies avec un schéma temporel entièrement implicite. Les conditions frontières aux surfaces internes décrites aux paragraphes 3.4.5.1 à 3.4.5.5, seront détaillées dans les chapitres qui suivent.

## CHAPITRE 4

### ÉCHANGES THERMIQUES AUX SURFACES EXTERNES DES PAROIS

#### 4.1 Introduction

Ce chapitre traite des échanges thermiques se produisant aux surfaces extérieures. La première partie du chapitre identifie les différentes irradiances solaires incidentes sur une surface. Ensuite le concept de température sol-air est introduit. Finalement, l'équation donnant le flux thermique au travers des parois est présentée. Il est à noter que B5EES ignore les masques proches et lointains, ils ne seront donc pas traités ici.

Avant d'aborder le sujet proprement dit, rappelons quelques définitions terminologiques relatifs au rayonnement. Le rayonnement désigne tout transfert d'énergie par les ondes électromagnétiques. Ce terme peut, par abus de langage désigner le rayonnement émis par une surface. D'autre part, l'irradiance est un flux de rayonnement reçu par une surface. En effet, l'irradiance solaire est une densité de puissance incidente sur une unité de surface par unité de temps. Elle est exprimée en  $\text{J/m}^2\cdot\text{s}$  (ou  $\text{W/m}^2$ ). Intégré sur une durée définie, le flux de rayonnement incident sur l'unité de surface s'appelle irradiation et est exprimé en  $\text{J/m}^2$ . Dans le fichier météo dont nous nous servons, l'irradiation solaire est exprimée en  $\text{kJ/m}^2$ .

#### 4.2 Irradiances solaires

Tel que montré à la figure 4.1, l'irradiation totale de courte longueur d'onde  $G_t$  atteignant une surface terrestre est la somme de l'irradiation directe  $G_D$ , l'irradiation diffuse  $G_d$ , et l'irradiation diffuse réfléchiée par le sol  $G_R$ .

$$G_t = G_D + G_d + G_R \quad (4.1)$$

#### 4.2.1 Irradiation solaire directe

L'irradiation directe est le produit de l'irradiation directe normale  $G_{ND}$  avec le cosinus de l'angle d'incidence  $\theta$ .

$$G_D = C_N G_{ND} \cos \theta \quad (4.2)$$

L'indice de clarté  $C_N$  est souvent supposé égale à l'unité.

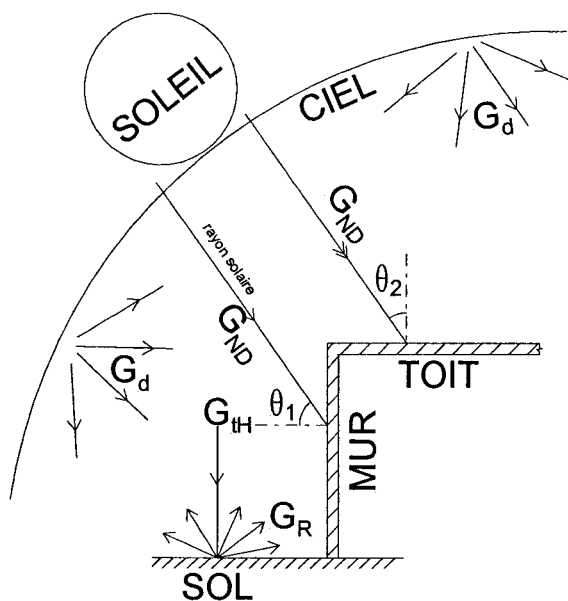


**Figure 4.1 :** Irradiations incidentes sur les murs et le toit

#### 4.2.2 Irradiation solaire diffuse

L'irradiation diffuse, supposée uniforme dans toutes les directions est évaluée avec la relation :

$$G_d = G_{dH} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (4.3)$$

où

$G_{dH}$  est l'irradiation diffuse sur un plan horizontal et  $\beta$  est l'angle d'inclinaison du plan par rapport à l'horizontale.

#### 4.2.3 Irradiation solaire diffuse réfléchie

L'irradiation réfléchie est l'irradiation globale réfléchie du sol et arrivant à la surface considérée. Cette dernière supposée idéalement diffuse est déterminée par l'équation :

$$G_R = \rho G_{tH} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4.4)$$

$G_{tH}$  étant l'irradiation globale (direct + diffus) reçue par une surface horizontale et  $\rho$ , le coefficient de réflexion du sol (ou albédo).

#### 4.2.4 Angle d'incidence $\theta$

Les données des fichiers météo fournissent généralement les valeurs de l'irradiation globale horizontale  $G_{tH}$ , l'irradiation normale directe  $C_N G_{ND}$  et l'irradiation horizontale diffuse  $G_{dH}$ . Il nous reste alors à déterminer l'angle d'incidence  $\theta$ .

Tel que montré à la figure 4.2, l'angle d'incidence  $\theta$  dépend de la position du soleil et de la surface considérée. Sur la Figure 4.2, les angles importants sont les suivants :

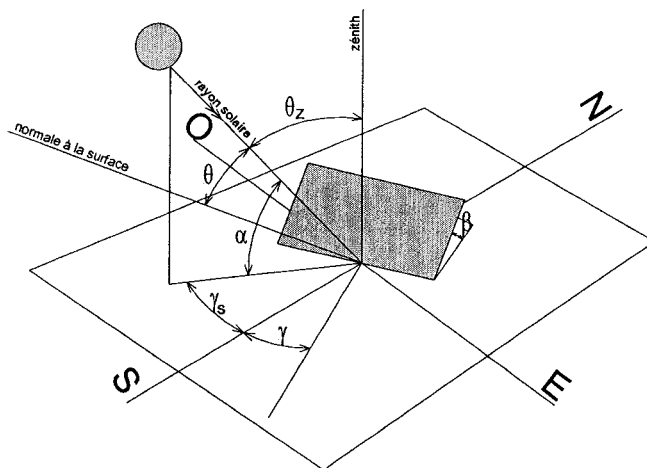


**Figure 4.2 :** Angles relatifs à un plan quelconque

$\phi$ , latitude

$\beta$ , inclinaison du plan par rapport à l'horizontal

$\gamma$ , azimut du plan

$\alpha$ , hauteur solaire

$\theta_z$ , angle du zénith

$\gamma_s$ , azimut du soleil

$\theta$ , angle d'incidence du rayonnement solaire, entre le rayonnement direct et la normale à la surface considérée.

Se référant à la Figure 4.2, l'angle d'incidence  $\theta$  est calculé avec les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (4.5)$$

où  $\delta$  est la déclinaison de la terre, soit l'angle formé par la direction du rayonnement solaire et le plan de l'équateur.

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (4.6)$$

où  $n$  est le jour de l'année.

L'angle horaire  $\omega$  est l'angle du plan méridien qui passe par l'axe des pôles et la direction du soleil. Il est négatif le matin et positif l'après-midi.

$$\omega = 15(TS - 12,5) \quad (4.7)$$

Pour assurer une symétrie et comme le fichier météo est rapporté de l'heure 1 à 24, l'angle horaire zéro est amené à l'heure 12,5. En d'autres mots, 12,5 se retrouve à mi-chemin entre 1 et 24.

Comme toutes les relations utilisent l'heure solaire  $TS$ , la transformation du temps civil  $TC$  en temps solaire sera nécessaire dans certains cas où les fichiers météo fournissent des données basées sur le temps civil. Celle-ci fait intervenir la longitude locale  $L_{loc}$ , la longitude de référence  $L_{réf}$  et la correction du temps  $E$ .

$$TS = TC + \frac{L_{réf} - L_{loc}}{15} + E \quad (4.8)$$

où

$$E = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B, \quad B = \frac{360(n-81)}{364} \quad (4.9)$$

$B$  est en degrés et  $E$  est en minutes

$TC$  est le temps civil

$TS$  est le temps solaire

#### 4.2.4.1 Irradiation solaire totale incidente

Connaissant tous les paramètres requis, nous pouvons calculer l'irradiation solaire incidente aux surfaces extérieures d'un bâtiment à l'aide de l'équation suivante :

$$G_t = C_N G_{ND} \cos \theta + G_{dH} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho G_{tH} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4.10)$$

Dans notre cas où les murs sont verticaux et le toit horizontal (Figure 4.1), les deux équations particulières suivantes sont utilisées.

Pour les murs,  $\beta=90$

$$G_{t1} = C_N G_{ND} \cos \theta_1 + \frac{1}{2} G_{dH} + \frac{1}{2} \rho G_{tH} \quad (4.11)$$

Pour le toit,  $\beta=0$

$$G_{t2} = C_N G_{ND} \cos \theta_2 + G_{dH} \quad (4.12)$$

### 4.3 Température sol-air

La température sol-air est la température équivalente de l'air ambiant, en absence de tout rayonnement, qui donne le même flux thermique à la surface extérieur que dans le cas où l'on considère le rayonnement solaire incident ( $G_t$  sur la Figure 4.3), les échanges radiatifs avec le ciel et l'environnement extérieur ( $\Delta R$  sur la Figure 4.3), et l'échange convectif avec l'air extérieur ( $h_c$  sur la Figure 4.3).

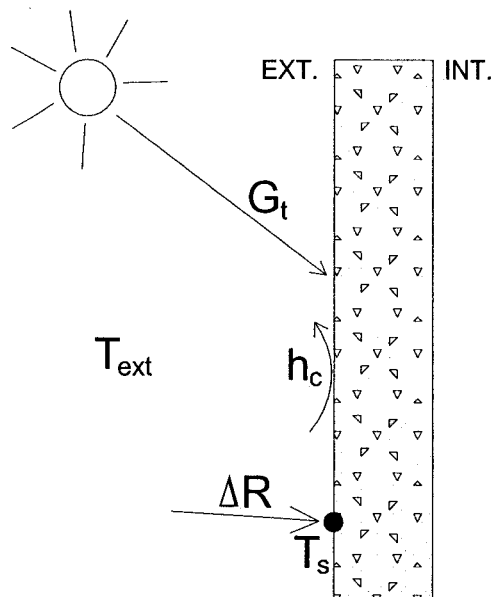


**Figure 4.3:** Concept de température sol-air

Le bilan thermique au niveau de la surface ensoleillée donne le flux thermique  $Q/A$  entrant dans la surface :

$$Q/A = \alpha G_t + h_0 (T_{ext} - T_s) - \varepsilon \Delta R \quad (4.13)$$

où

- $G_t$ , l'irradiance solaire totale incidente,  $\text{W/m}^2$  (nous gardons cette notation mais en prenant soin de diviser les irradiances en  $\text{kJ/m}^2$  par 3,6 pour obtenir des  $\text{W/m}^2$ )
- $\alpha$  est l'absorptivité de la surface pour le rayonnement solaire
- $h_0$ , le coefficient de transfert équivalent (rayonnement de grandes longueurs d'onde et convection) à la surface extérieure,  $\text{W/m}^2.\text{K}$
- $T_{ext}$ , la température ambiante extérieure,  $^{\circ}\text{C}$
- $T_s$ , la température superficielle extérieure,  $^{\circ}\text{C}$
- $\varepsilon$ , l'émissivité de la surface
- $\Delta R$ , la différence entre le rayonnement incident provenant du ciel et des environs, et le rayonnement émis par un corps noir de température égale à la température extérieure,  $\text{W/m}^2$ .

Il est utile de convertir l'équation (4.13) en une équation plus simple faisant intervenir la température sol-air  $T_e$ .

$$Q/A = h_0 (T_e - T_s) \quad (4.14)$$

Des équations (4.13) et (4.14), on déduit la température sol-air  $T_e$  :

$$T_e = T_{ext} + \frac{\alpha G_t}{h_0} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_0} \quad (4.15)$$

Pour une surface horizontale qui reçoit uniquement du rayonnement de grande longueur d'onde du ciel, une valeur appropriée de  $63 \text{ W/m}^2$  est attribuée à  $\Delta R$  (ASHRAE, 1997).

Ainsi, si on suppose  $\varepsilon = 1$  et  $h_0 = 17 \text{ W/m}^2\text{.K}$ , le terme de correction de grandes longueurs d'onde vaut  $3,9^\circ\text{C}$ .

Lorsqu'une surface verticale reçoit du rayonnement de grandes longueurs d'onde provenant du sol et du ciel, il est difficile de déterminer des valeurs précises de  $\Delta R$ . ASHRAE (1997) recommande de fixer  $\Delta R=0$  dans ces situations.

Pour ce qui est du terme  $\alpha/h_0$ , ASHRAE recommande les valeurs suivantes :

$\alpha/h_0 = 0,026 \text{ m}^2\text{.}^\circ\text{C/W}$  pour les surfaces pâles

$\alpha/h_0 = 0,053 \text{ m}^2\text{.}^\circ\text{C/W}$  pour les surfaces foncées

Ce flux thermique  $Q/A$  est utilisé comme condition de frontière dans l'équation (3.11).

## **CHAPITRE 5**

### **FENÊTRES EXTÉRIEURES ET PLANCHER**

#### **5.1 Introduction**

Le plus grand avantage associé aux fenêtres est la lumière naturelle qu'elles procurent. Toutefois, les fenêtres sont souvent associées à des pertes thermiques relativement importantes. Dans certains cas, les gains solaires transmis au travers des fenêtres permettent de contrecarrer ces pertes. Ce chapitre présente la technique utilisée pour quantifier les apports solaires et les pertes thermiques associées aux fenêtres. De plus, comme les gains solaires sont reçus par le plancher, la dernière partie de ce chapitre montre la procédure de conversion des gains solaires en conditions frontières pour le plancher.

#### **5.2 Transfert thermique au travers une fenêtre**

Les différents mécanismes par lesquels la chaleur traverse une fenêtre sont (Hallé, 2001) :

- transfert de chaleur par conduction et convection causé par la différence de la température intérieure et extérieure
- échange radiatif de grandes longueurs d'onde entre la fenêtre et son environnement
- rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde incident sur la fenêtre.

Le taux de transfert de chaleur au travers la fenêtre est donné par :

$$Q_{F,0} = U A_F (T_{ext} - T_{int}) + (SHGC) A_F G_t \quad (5.1)$$

où

$Q_{F,0}$  est le taux de transfert de chaleur traversant la fenêtre, W

$U$ , le coefficient de transfert thermique global,  $W/m^2.K$

$A_F$ , la surface totale de la fenêtre,  $m^2$

$T_{ext}$ , la température ambiante extérieure,  $^{\circ}C$

$T_{int}$ , la température de l'air intérieur,  $^{\circ}C$

$SHGC$ , le coefficient de gains thermiques solaires

$G_t$ , l'irradiance incidente totale,  $W/m^2$

Chaque terme de cette équation est présenté schématiquement à la figure 5.1. Ainsi, le premier terme désigne généralement les pertes (gains) thermiques dites « par conduction ». En réalité, ces pertes (gains) par conduction sont les résultats de transferts thermiques par conduction, convection, et rayonnement.

La figure 5.1 montre que le deuxième terme est en fait constitué de deux termes soit le rayonnement solaire transmis au travers la fenêtre et le rayonnement solaire absorbé par les surfaces opaques (cadre) de la fenêtre et réémis vers l'intérieur par les surfaces intérieures de la fenêtre.

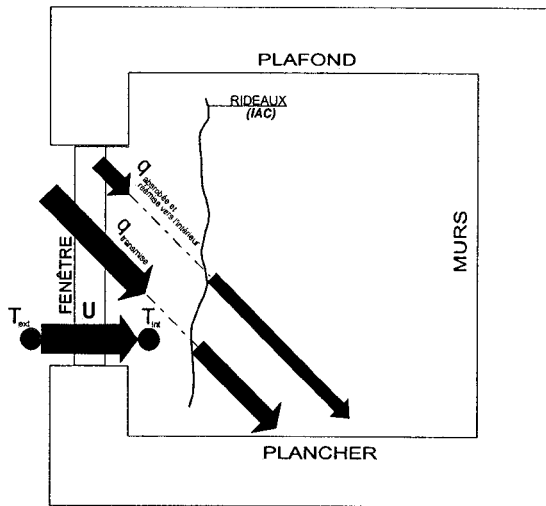


**Figure 5.1 :** Énergie passant au travers une fenêtre

### 5.2.1 Coefficient de déperdition thermique $U$ d'une fenêtre

Le coefficient de déperdition thermique  $U$  de l'équation (5.1) est le résultat d'un mélange complexe de trois types de transferts thermiques : la conduction au travers la partie opaque (cadre) et la portion vitrée ; la convection au niveau des surfaces extérieure et intérieure de la fenêtre, ainsi qu'à l'intérieur des fenêtres à vitrage multiple ; et l'échange radiatif de grandes longueurs d'onde au niveau des surfaces intérieure et extérieure, ainsi que entre les surfaces internes de vitrage multiples.

ASHRAE (ASHRAE, 2001) fournit des valeurs de  $U$  pour plusieurs types de vitrage munis de cadres aux dimensions normalisées. Il est important de rappeler que ces valeurs ont été évaluées pour des coefficients d'échange externe et interne de  $29 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  et  $h_{int} = 8,29 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , respectivement (cf. ASHRAE, 2001). Par conséquent, leur utilisation devrait se limiter au stade d'estimation d'avant-projet, ce qui correspond bien à notre cahier de charge.

La valeur du facteur  $U$  de la fenêtre (Figure 5.2) dépend :

- de l'épaisseur des vitrages,
- de l'épaisseur de la lame de gaz et du type de gaz de remplissage,
- de l'émissivité des surfaces,
- du nombre de vitrage.
- du type et de la dimension du cadre.

### 5.2.2 Implémentation du facteur $U$

Les valeurs des facteurs  $U$  sont fournies sous forme tabulée par ASHRAE pour des fenêtres courantes. Or, comme le logiciel calcule séparément les échanges convectif et radiatif au niveau de la surface intérieure de la fenêtre, il est nécessaire de transformer la valeur de  $U$  pour en extraire les coefficients de film par convection et rayonnement à la surface interne. En admettant que le vitrage et le cadre sont à la même température sur la surface intérieure, il est possible d'écrire :

$$1/U = 1/h_l + 1/h_{0,int} \quad (5.2)$$

où

- $h_{0,int}$  est le coefficient d'échange (convection et rayonnement) à la surface intérieure de la fenêtre,  $W/m^2.K$
- $h_l$  est l'inverse de la résistance thermique du vitrage entre l'air extérieur et la surface intérieure du vitrage,  $W/m^2.K$

Rappelons que  $U$  est calculé avec une valeur de  $h_{0,int}$  égale à  $8,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ . ASHRAE (2001) recommande une valeur de  $5,13 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour la portion radiative. Donc, par simple soustraction on obtient la portion convection du coefficient d'échange intérieur.

$$h_{F,conv} = 8,29 - 5,13 = 3,16 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### 5.2.3 Gains solaires au travers la fenêtre

Le deuxième terme de l'équation (5.1) correspond aux gains solaires qui traversent la fenêtre.

Telle que montrée à la figure suivante, une fenêtre est généralement constituée d'une partie vitrée, plus ou moins transparente au rayonnement solaire, et d'une partie opaque, le cadre. Une fenêtre peut comporter un simple vitrage, ou plusieurs vitrages espacés par des lames de gaz.

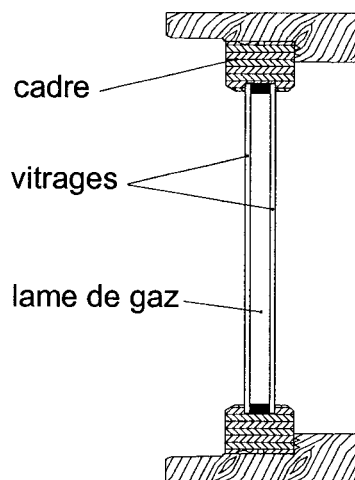


**Figure 5.2 :** Éléments principaux d'une fenêtre

Les phénomènes de rayonnements solaires associés aux fenêtres sont montrés à la Figure 5.3. Les trois irradiances solaires contribuent (directe, diffuse et réfléchie diffuse) aux gains solaires au travers la fenêtre.

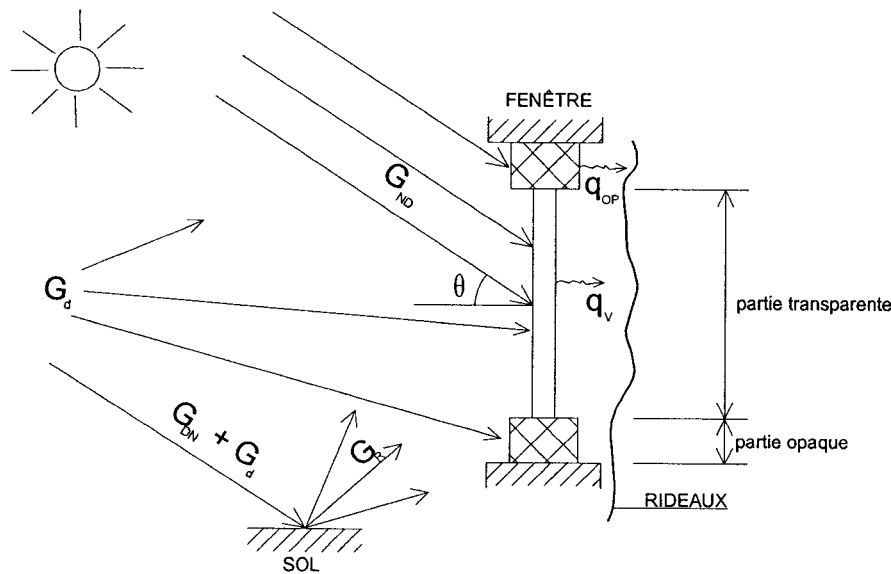


**Figure 5.3 :** Gains thermiques solaires aux travers d'une fenêtre

C'est évidemment au travers de la partie transparente que s'effectue la majorité des gains solaires. Une partie du rayonnement solaire incident sur le cadre sera absorbée par celui-ci. Une portion de cette quantité sera transmise au travers du cadre par conduction pour se retrouver sur la face intérieure du cadre où cette chaleur sera libérée dans la pièce. Il y a donc deux gains solaires associés aux fenêtres : les gains solaires par la partie vitrée,  $q_V$ , et les gains solaires par la partie opaque,  $q_{OP}$ . Ces gains sont fonction de l'angle d'incidence  $\theta$ .

$$q_{total,\theta} = q_{V,\theta} + q_{OP,\theta} \quad (5.3)$$

Pour compléter l'analyse de la Figure 5.3, il y a lieu de mentionner, tel que décrit précédemment, que le rayonnement solaire incident est constitué de trois termes :  $G_D$ ,

l'irradiation directe;  $G_d$ , l'irradiation diffuse; et  $G_R$ , l'irradiation diffuse réfléchi par le sol. Finalement, certaines fenêtres possèdent des rideaux (ou stores) qui atténuent les gains solaires.

### 5.2.3.1 Gains par la portion vitrée

ASHRAE (ASHRAE, 2001) a identifié une série de vitrages dits « standard ». Le tableau 5.1 présente ceux qui seront utilisés dans le présent travail. L'examen de ce tableau montre que plusieurs paramètres sont considérés dont le nombre des vitres, l'épaisseur de la lame de gaz et le type de gaz de remplissage, l'émissivité des surfaces et la teinte des vitres.

**Tableau 5.1** : Définition des sigles désignatifs de vitrage de ASHRAE utilisé dans le logiciel

| Désignation | Vitrage                                                |
|-------------|--------------------------------------------------------|
| <b>1a</b>   | simple vitrage 3,2mm – Claire                          |
| <b>1f</b>   | simple vitrage 3,2mm – Vert                            |
| <b>5a</b>   | double vitrage – Air 12,7 mm – Claire-Claire           |
| <b>5c</b>   | double vitrage – Air 12,7 mm – Bronze-Claire           |
| <b>7a</b>   | double vitrage – Argon 12,7 mm – Claire-Claire         |
| <b>7c</b>   | double vitrage – Argon 12,7 mm – Bronze-Claire         |
| <b>17c</b>  | double vitrage – Air 12,7 mm – e=0,2 – Claire-LE       |
| <b>17e</b>  | double vitrage – Air 12,7 mm – e=0,2 – Bronze-LE       |
| <b>19c</b>  | double vitrage – Argon 12,7 mm – e=0,2 – Claire-LE     |
| <b>19e</b>  | double vitrage – Argon 12,7 mm – e=0,2 – Bronze-LE     |
| <b>29a</b>  | triple vitrage – Air 12,7 mm – Claire-Claire-Claire    |
| <b>32a</b>  | triple vitrage – Air 6,4 mm – e=0,2 – LE-Claire-Claire |
| <b>32c</b>  | triple vitrage – Air 6,4 mm – e=0,2 – Claire-Claire-LE |

Le concept de coefficients de gains solaires (*Solar Heat Gain Coefficient, SHGC*), préconisée par ASHRAE (2001), sera utilisée ici pour déterminer les gains solaires totaux au travers des fenêtres.

Ce coefficient est défini comme étant la fraction du rayonnement solaire incident qui traverse la fenêtre et qui devient un gain thermique à l'intérieur. Il comprend le rayonnement solaire transmis directement et le rayonnement solaire absorbé par le vitrage puis réémis dans la pièce.

Étant donné que les propriétés optiques des vitrages changent en fonction de l'angle d'incidence, le *SHGC* est fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Donc les gains thermiques au travers la partie vitrée de la fenêtre,  $q_V$ , sont données par :

$$q_V = G_D SHGC(\theta) + (G_d + G_r) SHGC_d = G_{DN} \cos \theta SHGC(\theta) + (G_d + G_r) SHGC_d \quad (5.4)$$

où  $\theta$  est l'angle d'incidence du rayonnement solaire direct par rapport à la normale de la surface extérieure de la fenêtre,  $SHGC(\theta)$  est le coefficient de gains solaires en fonction de l'angle  $\theta$ , et  $SHGC_d$  est le coefficient de gains solaires diffus. ASHRAE suppose une valeur constante, indépendante de l'angle d'incidence, pour ce dernier coefficient.

Le tableau suivant donne les valeurs de  $SHGC(\theta)$  et  $SHGC_d$  pour les fenêtres utilisées dans le présent travail. Ces valeurs sont issues de ASHRAE (2001).

**Tableau 5.2 :** Valeurs de  $SHGC(\theta)$  et  $SHGC_d$  pour les types de vitrage utilisés dans le logiciel

| Type du vitrage | <i>SHGC(<math>\theta</math>)</i> |      |      |      |      |      |    | <i>SHGC<sub>d</sub></i> |
|-----------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|----|-------------------------|
|                 | <i>Angle <math>\theta</math></i> |      |      |      |      |      |    |                         |
|                 | 0                                | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90 |                         |
| <b>1a</b>       | 0,86                             | 0,84 | 0,82 | 0,78 | 0,67 | 0,42 | 0  | 0,78                    |
| <b>1f</b>       | 0,6                              | 0,58 | 0,56 | 0,52 | 0,45 | 0,29 | 0  | 0,54                    |
| <b>5a</b>       | 0,76                             | 0,74 | 0,71 | 0,64 | 0,5  | 0,26 | 0  | 0,66                    |
| <b>5c</b>       | 0,62                             | 0,6  | 0,57 | 0,51 | 0,39 | 0,2  | 0  | 0,53                    |
| <b>7a</b>       | 0,76                             | 0,74 | 0,71 | 0,64 | 0,5  | 0,26 | 0  | 0,66                    |
| <b>7c</b>       | 0,62                             | 0,6  | 0,57 | 0,51 | 0,39 | 0,2  | 0  | 0,53                    |
| <b>17c</b>      | 0,7                              | 0,68 | 0,65 | 0,59 | 0,46 | 0,24 | 0  | 0,61                    |
| <b>17e</b>      | 0,57                             | 0,54 | 0,51 | 0,46 | 0,35 | 0,18 | 0  | 0,48                    |
| <b>19c</b>      | 0,7                              | 0,68 | 0,65 | 0,59 | 0,46 | 0,24 | 0  | 0,61                    |
| <b>19e</b>      | 0,57                             | 0,54 | 0,51 | 0,46 | 0,35 | 0,18 | 0  | 0,48                    |
| <b>29a</b>      | 0,68                             | 0,65 | 0,62 | 0,54 | 0,39 | 0,18 | 0  | 0,57                    |
| <b>32a</b>      | 0,6                              | 0,58 | 0,55 | 0,48 | 0,35 | 0,17 | 0  | 0,51                    |
| <b>32c</b>      | 0,62                             | 0,6  | 0,57 | 0,49 | 0,36 | 0,16 | 0  | 0,52                    |

Il y a lieu de signaler que ces valeurs ont été obtenues à l'aide du spectre solaire standard de masse d'air égale à 1,5.

### 5.2.3.2 Gains par la portion opaque

Une approche similaire à celle exposée ci haut est utilisée pour déterminer les gains par la partie opaque de la fenêtre. Ainsi, ASHRAE (2001) utilise un coefficient de gains solaires pour la partie opaque,  $SHGC_{OP}$ , qui permet de déterminer les gains solaires provenant de la partie opaque de la fenêtre,  $q_{OP}$  :

$$q_{OP} = (G_{DN} \cos \theta + G_d + G_R) SHGC_{OP} \quad (5.5)$$

Pour les cadres standard, ASHRAE (2001) fournit des valeurs de  $SHGC_{OP}$  selon les matériaux de cadre utilisés.

**Tableau 5.3** : Coefficient de gains solaires opaque, surface totale et pourcentage de surface opaque pour les fenêtres standard

| Matériaux                           | Aluminium |      | Autres   |      |
|-------------------------------------|-----------|------|----------|------|
| Cadre                               | Opérable  | Fixe | Opérable | Fixe |
| $SHGC_{OP}$                         | 0,14      | 0,11 | 0,04     | 0,03 |
| Surface totale<br>en m <sup>2</sup> | 1,4       | 2,2  | 1,4      | 2,2  |
| % de surface<br>opaque, $c$         | 15%       | 11%  | 27%      | 13%  |

Selon le type et le matériau du cadre, la surface totale d'une fenêtre ainsi que le pourcentage en surface opaque de cette dernière sont standard (Tableau 5.3). Par

ailleurs, le logiciel prévoit une entrée de données distinctes pour d'autres types de fenêtres.

### 5.2.3.3 Rideaux et stores

Pour compléter cette rubrique, les effets des rideaux et stores sont représentés par un coefficient d'atténuation interne,  $IAC$ . Ainsi, pour une fenêtre de surface totale  $A_F$ , le taux de transfert thermique est donné par :

$$Q_{FEN,TOTAL} = [q_V (1-c) + q_{OP} c] A_F \times IAC \quad (5.6)$$

où  $c$  est le pourcentage de surface occupé par la partie opaque (Tableau 5.3).

Dans le logiciel, trois sélections de  $IAC$  sont possibles.

**Tableau 5.4 :** Coefficient d'atténuation interne utilisé dans le logiciel

| Sélection | IAC  |
|-----------|------|
| Aucun     | 1    |
| Moyen     | 0,75 |
| Beaucoup  | 0,5  |

Un  $IAC$  de 0,5 signifie que seulement la moitié des gains traversant la fenêtre deviennent un gain effectif aux fins du calcul des besoins d'un bâtiment.

Finalement, l'annexe A présente un exemple de calcul qui utilise les techniques exposées dans le présent chapitre.

### 5.3 Plancher

Le plancher se comporte comme les autres surfaces du point de vue de la conduction thermique transitoire sauf pour deux conditions frontières. Ainsi la surface « externe » du plancher ne reçoit aucun rayonnement solaire. En revanche, la surface intérieure du plancher reçoit une grande portion du rayonnement solaire transmis par les fenêtres.

#### 5.3.1 Frontière extérieure du plancher

La face « externe » du plancher se trouve à l'intérieur d'une pièce du niveau inférieur. On supposera que cette pièce adjacente est maintenue à une température  $T_{adj}$  tout au long de l'année. De plus, on suppose que le coefficient d'échange combiné (convection et rayonnement),  $h_{adj}$ , est constant durant toute l'année. En pratique nous choisirons  $h_{adj} = 6,13 \text{ W/m}^2.\text{K}$  comme nous suggère la littérature (Judkoff et Neymark 1995).

Le bilan thermique au niveau de cette frontière extérieure peut alors s'écrire comme suit :

$$Q_P = A_P h_{adj} (T_{adj} - T_{P,ext}) \quad (5.7)$$

où

- $A_P$  est la surface du plancher,  $\text{m}^2$
- $h_{adj}$ , le coefficient de film extérieur au plancher,  $\text{W/m}^2.\text{K}$
- $T_{adj}$ , la température de la pièce adjacente,  $^{\circ}\text{C}$
- $T_{P,ext}$ , la température de la face extérieure du plancher,  $^{\circ}\text{C}$

### 5.3.2 Frontière intérieure du plancher

De façon à pouvoir considérer simplement le rayonnement solaire transmis au travers des fenêtres (paragraphe 5.2.3.3) on suppose que ce dernier est reparti uniformément sur le plancher et entièrement absorbé. On suppose donc que le plancher possède une absorptivité égale à 1 pour ce flux radiatif. En d'autres mots, le flux  $Q_{FEN,TOTAL}/A_P$  sera rajouté au flux incident  $q_B$  au nœud périphérique interne du plancher dans l'équation de conduction thermique transitoire (équation 3.11, § 3.4.4).

## CHAPITRE 6

### ÉCHANGES THERMIQUES AUX SURFACES INTERNES DES PAROIS

#### 6.1 Échanges de grandes longueurs d'onde entre les parois d'une pièce

Tel que montré sur la figure 3.5 présentant les conditions de frontière, la détermination des besoins thermiques d'une pièce passe par une évaluation des échanges par rayonnement de grandes longueurs d'onde (GLO) entre les parois. Ces échanges sont généralement compris entre  $10^{-1}$  et  $10^2 \mu\text{m}$  (Incropera et DeWitt, 1990). La présente section présente la technique utilisée pour évaluer ces échanges.

Pour illustrer la résolution des échanges de GLO par le logiciel, un cas particulier sera examiné. Il s'agit d'une zone parallélépipédique dont les six faces représentent les quatre murs, le plafond et le plancher. Chaque mur peut contenir une fenêtre. C'est donc un total de dix surfaces qui seront prises en compte.

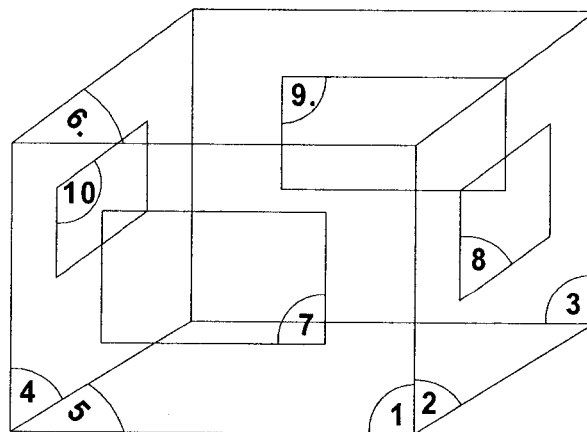


**Figure 6.1 :** Nomenclature des surfaces pour les calculs des facteurs de forme

### 6.1.1 Hypothèses

Avant d'aborder la méthode employée, il est bon de rappeler les hypothèses généralement admises pour traiter des échanges de GLO entre les parois d'une enceinte :

- La température de chaque surface est uniforme
- Les surfaces sont considérées opaques, grises et diffuses
- D'un point de vue radiatif, l'air de la pièce est traité comme un milieu non participant.

### 6.1.2 Méthode des radiosités

La méthode employée pour traiter des échanges de GLO est la technique classique des radiosités (Incropera et DeWitt, 1990). L'échange entre les dix surfaces peut être représenté schématiquement par la figure suivante.

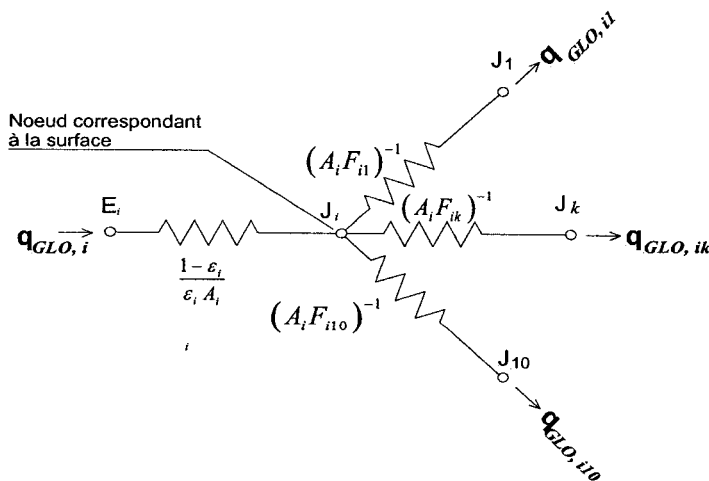


**Figure 6.2 :** Réseau d'échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde entre la surface  $i$  et les autres surfaces de l'enceinte

En utilisant la nomenclature présentée à la Figure 6.2, le taux de transfert thermique d'une surface  $i$ , dénoté ici par  $q_{GLO,i}$ , est donné par la relation suivante :

$$q_{GLO,i} = \frac{E_i - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}} \quad (6.1)$$

$E_i$  est la puissance émissive d'un corps noir de température  $T_{s,int,i}$  :

$$E_i = \sigma T_{s,int,i}^4 \quad (6.2)$$

Dans la présente étude, les différentes valeurs de  $T_{s,int,i}$  sont connues. Conséquemment, les différentes valeurs de  $E_i$  sont connues. Cependant, pour évaluer  $q_{GLO,i}$ , il faut connaître  $J_i$ , la radiosité de la surface  $i$ . Pour obtenir cette valeur il est nécessaire de calculer l'échange radiatif entre toutes les surfaces. Ainsi en comptabilisant les différents échanges on obtient :

$$q_{GLO,i} = \sum_{k=1}^{10} A_i F_{i,k} (J_i - J_k) \quad (6.3)$$

où

- $J_i$  représente la radiosité de la surface  $i$  d'émissivité  $\varepsilon_i$  et d'aire  $A_i$ , W/m<sup>2</sup>
- $F_{i,k}$  est le facteur de forme entre les surfaces  $i$  et  $k$ .

En combinant les équations (6.1) et (6.3), on retrouve l'équation suivante :

$$\frac{E_i - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} A_i} = \sum_{k=1}^{10} A_i F_{i,k} (J_i - J_k) \quad (6.4)$$

En établissant une équation de ce type pour chaque surface, on retrouve un système de 10 équations et 10 inconnues. Dans le logiciel présenté dans ce mémoire, ce système est résolu par le solveur de EES (Klein et Alvarado, 2002) sans qu'aucune autre procédure de calcul ne soit requise.

### 6.1.3 Facteur de forme

#### 6.1.3.1 Introduction

Le facteur de forme  $F_{ij}$  est défini comme la fraction de radiation quittant la surface  $A_i$  qui est interceptée par la surface  $A_j$ . Il dépend de la géométrie et de l'orientation des deux surfaces. L'équation (6.5) présente la forme générale de l'équation utilisée pour évaluer les facteurs de forme. Il existe des solutions analytiques simples de cette équation pour les formes géométriques usuelles. Leur adaptation à la présente étude s'avère toutefois très complexe étant donné la forme relativement complexe que peut prendre le bâtiment (Figure 6.3). Une formulation relativement simple, qui ne fait pas intervenir la description géométrique de l'enceinte, du calcul des facteurs de forme est proposée dans les paragraphes qui suivent.

### 6.1.3.2 Présentation de la géométrie

Dans sa forme la plus générale, le bâtiment traité est un bâtiment multizone qui peut ressembler au bâtiment présenté à la figure 6.3.

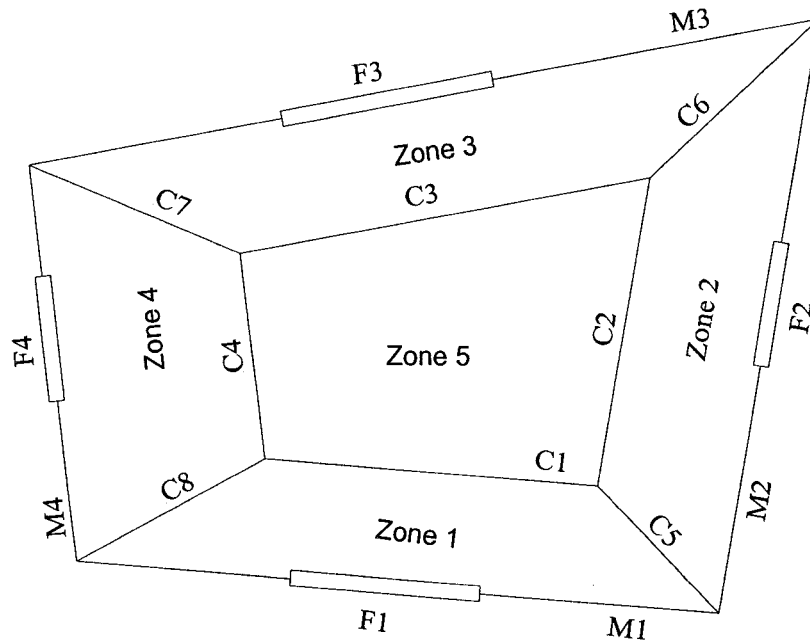


**Figure 6.3 :** Modèle du bâtiment élaboré par B5EES

Ce bâtiment comporte cinq zones (zone 1 à 5) et est composé de quatre murs extérieurs (M1 à M4), quatre fenêtres (F1 à F4) et huit cloisons internes (C1 à C8). Au tout se rajoutent le plafond et le planché qui sont horizontaux.

### 6.1.3.3 Méthodes de calcul utilisées

#### 6.1.3.3.1 Méthodes exactes

Le facteur de forme entre deux surfaces quelconques  $S_1$  et  $S_2$  est donnée par la formule générale :

$$F_{ij} = \frac{1}{S_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dS_i dS_j \quad (6.5)$$

De plus, il est possible de démontrer deux caractéristiques importantes des facteurs de forme, soit la réciprocité et la complémentarité.

#### 1. Réciprocité

Pour deux surfaces  $A_i$  et  $A_j$ , la relation de réciprocité est donnée par :

$$S_i F_{ij} = S_j F_{ji} \quad (6.6)$$

#### 2. Complémentarité

Pour une enceinte fermée composée de  $n$  surfaces, le rayonnement quittant la surface  $i$  doit être intercepté par les autres surfaces de l'enceinte (y compris la surface  $i$  si elle est concave). D'où la somme :

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1, \quad i = 1..n \quad (6.7)$$

L'équation (6.5) est relativement complexe à résoudre. Des formulations plus simples ont été élaborées pour des géométries usuelles (ASHRAE, 1975). Des formulations spécifiques aux géométries d'un bâtiment ont également été développées (Clarke, 1985 et Klein et al., 1996). Ces méthodes sont cependant utilisées pour des problèmes de bâtiments de forme parallélépipédique, ce qui ne leur permet pas de s'adapter à des géométries du type de celle présentée à la figure 6.3.

#### 6.1.3.3.2 Méthodes approximatives

##### *Approches classiques*

Des techniques de pondération simples sont souvent utilisées sans pertes significatives de précision (Clarke, 1985). Deux cas, utilisant une pondération basée sur l'aire des surfaces sont fréquemment rencontrés dans la littérature.

Le premier cas (Walton, 1980) calcule les facteurs de formes par la relation :

$$F_{ij} = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^n S_j - S_i} \text{ et } F_{ii} = 0 \quad (6.8)$$

Elle permet d'obtenir un bilan exact suite à la réalisation de la complémentarité (Équation 6.7). C'est cet algorithme que BLAST utilise dans son calcul de facteur de forme (Walton, 1980). Mais la réciprocité des facteurs de forme n'est pas toujours vraie avec cette formulation (elle n'est vérifiée que si  $S_i = S_j$ ).

Quant au deuxième cas, l'approche consiste à pondérer l'inverse de la somme des aires avec l'aire de la surface avec laquelle la surface  $S_i$  échange (Allard et al., 1986).

$$F_{ij} = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^n S_j} \text{ et } F_{ii} = 0 \quad (6.9)$$

Cette deuxième approximation vérifie naturellement la réciprocité mais sa lacune repose sur le non-respect du critère de complémentarité.

En effet, comme la surface  $S_i$  est plane, on doit fixé pour  $i=j$ ,  $F_{ii}=0$ . Mais le fait de fixer  $F_{ii}$  à 0 nous amène à obtenir une somme de  $F_{ij}$  différente de 1. Pour mieux illustrer ce problème, considérons une enceinte fermée composée de trois surfaces telle que montrée par la figure suivante.

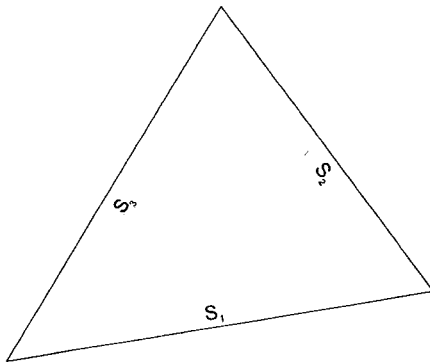


**Figure 6.4 :** Enceinte composée de trois surfaces

L'échange thermique de la surface  $S_1$  avec les deux autres surfaces fait intervenir les facteurs de forme suivants en utilisant l'équation (6.9) :

$$F_{11} = 0, F_{12} = \frac{S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \text{ et } F_{13} = \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (6.10)$$

La somme des  $F_{Ij}$  sera :

$$\sum_{j=1}^3 F_{Ij} = \frac{S_2 + S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (6.11)$$

On trouve alors que la complémentarité n'est pas vérifiée car la somme des  $F_{Ij}$  est différente de 1.

L'erreur vaut

$$1 - \sum_{j=1}^3 F_{Ij} = \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (6.12)$$

La correction consiste à répartir cette erreur sur les deux autres surfaces, proportionnellement à leurs aires ( $S_2$  et  $S_3$ ). Le facteur de correction proposé (Allard et al., 1986) pour la surface  $i$  est :

$$f_{c,i} = \left( \frac{S_i}{S_T} \right)^2 \quad (6.13)$$

Ainsi dans l'exemple présenté ci-dessus, les nouvelles valeurs des facteurs de forme,  $F_{12}^*$  et  $F_{13}^*$ , seront alors :

$F_{11} = 0$ , à garder

$$F_{12}^* = F_{12} + \left( \left( \frac{S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \right)^2 \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3} \right) \text{ et}$$

$$F_{13}^* = F_{13} + \left( \left( \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \right)^2 \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3} \right) \quad (6.14)$$

On peut étendre cette démarche pour notre cas où l'on peut avoir plusieurs surfaces. Les facteurs de forme  $F_{ij}$  sont calculés avec les équations (6.9). L'erreur de réciprocité vaut

$$1 - \sum_{j=1}^n F_{ij} = \frac{S_i}{S_T} \quad (6.15)$$

La suite consiste à répartir cette différence sur toutes les surfaces. Les nouvelles valeurs des facteurs de formes seront alors obtenues par :

$$F_{ij}^* = F_{ij} + \left( \left( \frac{S_j}{S_T} \right)^2 \frac{S_i}{S_T} \right) \quad (6.16)$$

$$\text{où } S_T = \sum_{j=1}^n S_j \quad (6.17)$$

On peut vérifier la réciprocité des nouveaux facteurs de forme. Ainsi, en combinant les équations (6.6) et (6.16) on obtient :

$$S_i \left[ F_{ij} + \left( \left( \frac{S_j}{S_T} \right)^2 \frac{S_i}{S_T} \right) \right] = S_j \left[ F_{ji} + \left( \left( \frac{S_i}{S_T} \right)^2 \frac{S_j}{S_T} \right) \right] \quad (6.18)$$

$$S_i F_{ij} + \left( \frac{S_j S_i}{S_T} \right)^2 = S_j F_{ji} + \left( \frac{S_i S_j}{S_T} \right)^2 \quad (6.19)$$

$$D'o\grave{u} \ S_i F_{ij} = S_j F_{ji} \quad (6.20)$$

### *Approche am\u00e9lior\u00e9e*

Le fait d'utiliser un facteur de correction  $(S_i/S_T)^2$  ne permet pas de repartir d'un seul coup la diff\u00e9rence  $(S_i/S_T)$  sur toutes les surfaces, d'autant plus que les facteurs  $F_{ii}$  doivent toujours \u00eatre ramen\u00e9s \u00e0 z\u00e9ro. Par cons\u00e9quent, au lieu d'en rester \u00e0 une premi\u00e8re correction et repartir  $(S_i/S_T)$ , on propose d'examiner l'erreur, i.e.  $1 - \sum_{j=1}^n F_{ij}$ , suite \u00e0 une correction et d'it\u00e9rer jusqu' \u00e0 ce que cette erreur soit n\u00e9gligeable.

On corrige alors les facteurs de forme obtenus par l'\u00e9quation (6.9) avec l'\u00e9quation it\u00e9rative suivante :

$$F_{ij}^* = F_{ij} + \left( \frac{S_j}{S_T} \right)^2 \left( 1 - \sum_{j=1}^n F_{ij} \right) \quad (6.21)$$

En fixant une erreur admissible (pour notre cas, on choisit  $10^{-5}$ ), on obtient les r\u00e9sultats approxims apr\u00e8s quelques it\u00e9rations. Ces derniers remplissent \u00e0 la fin des it\u00e9rations les deux crit\u00e8res importants des facteurs de formes, soit la r\u00e9ciprocit\u00e9 et la compl\u00e9mentarit\u00e9.

Prenons un cas concret d'une enceinte \u00e0 3 murs de surfaces respectives  $5m^2$ ,  $12m^2$  et  $7m^2$ . Le tableau suivant montre l'\u00e9volution des valeurs des facteurs de formes  $F_{ij}$  lors du processus it\u00e9ratif.

**Tableau 6.1 : Évolution des valeurs des facteurs de forme pour dix itérations**

| Surface   | S1               | S2                | S3               |                       |         |
|-----------|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|---------|
| Aire      | 5 m <sup>2</sup> | 12 m <sup>2</sup> | 7 m <sup>2</sup> |                       |         |
| Itération | $F_{11}$         | $F_{12}$          | $F_{13}$         | $\sum_{j=1}^3 F_{1j}$ | Erreur  |
| 1         | 0                | 0,50000           | 0,29167          | 0,79167               | 0,20833 |
| 2         | 0                | 0,55208           | 0,30939          | 0,86147               | 0,13853 |
| 3         | 0                | 0,58671           | 0,32117          | 0,90789               | 0,09211 |
| 4         | 0                | 0,60974           | 0,32901          | 0,93875               | 0,06125 |
| 5         | 0                | 0,62505           | 0,33422          | 0,95927               | 0,04072 |
| 6         | 0                | 0,63524           | 0,33768          | 0,97292               | 0,02708 |
| 7         | 0                | 0,64201           | 0,33999          | 0,98199               | 0,01801 |
| 8         | 0                | 0,64651           | 0,34152          | 0,98803               | 0,01197 |
| 9         | 0                | 0,64950           | 0,34254          | 0,99204               | 0,00796 |
| 10        | 0                | 0,65149           | 0,34322          | 0,99471               | 0,00529 |

L'avantage de cette approche améliorée est le fait qu'on peut rajouter autant de surfaces dans l'enceinte (ajout de fenêtre, par exemple) sans se soucier de sa géométrie. Elle est aussi bien pratique pour notre étude où la géométrie du plan du bâtiment n'est pas toujours rectangulaire.

#### 6.1.3.4 Validation du calcul des facteurs de forme utilisés par le logiciel

Deux types de validations sont effectués. La première consiste à comparer directement les résultats issus des calculs approximatifs avec ceux des abaques. La deuxième estime les erreurs relatives aux besoins énergétiques en utilisant les facteurs de formes calculés par B5EES.

##### 6.1.3.4.1 Comparaison aux abaques

Considérons une pièce fermée tel que celle présentées à la figure 6.1. Les six faces de la pièce sont numérotées de 1 à 6, tandis que les éventuelles fenêtres que comportent les

murs sont indexées de 7 à 10. Les résultats issus du logiciel sont comparés avec les résultats fournis par les abaques (Incropera et DeWitt, 1990).

Le premier cas étudié consiste en une pièce cubique (sans fenêtre) de 3m de long, 3m de large et 3m de haut. Les tableaux 6.2 et 6.3 montrent les résultats issus du logiciel et ceux issus des abaques.

**Tableau 6.2 : Résultats issus du logiciel pour une pièce de 3m × 3m × 3m**

| Surface <i>i</i> | Surface <i>j</i>    | 1                         | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 6                   |
|------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                  | Aire de la surface  | 9 [m <sup>2</sup> ]       | 9 [m <sup>2</sup> ] | 9 [m <sup>2</sup> ] | 9 [m <sup>2</sup> ] | 9 [m <sup>2</sup> ] | 9 [m <sup>2</sup> ] |
|                  |                     | Facteur de forme $F_{ij}$ |                     |                     |                     |                     |                     |
| 1                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0                         | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 |
| 2                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0                   | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 |
| 3                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0,2                 | 0                   | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 |
| 4                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0,2                 | 0,2                 | 0                   | 0,2                 | 0,2                 |
| 5                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0                   | 0,2                 |
| 6                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0                   |

**Tableau 6.3 : Résultats des abaques pour une pièce de 3m × 3m × 3m**

| Surface <i>i</i> | Surface <i>j</i>    | 1                         | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 6                   |
|------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                  | Aire de la surface  | 9 [m <sup>2</sup> ]       | 9 [m <sup>2</sup> ] | 9 [m <sup>2</sup> ] | 9 [m <sup>2</sup> ] | 9 [m <sup>2</sup> ] | 9 [m <sup>2</sup> ] |
|                  |                     | Facteur de forme $F_{ij}$ |                     |                     |                     |                     |                     |
| 1                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0                         | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 |
| 2                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0                   | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 |
| 3                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0,2                 | 0                   | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 |
| 4                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0,2                 | 0,2                 | 0                   | 0,2                 | 0,2                 |
| 5                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0                   | 0,2                 |
| 6                | 9 [m <sup>2</sup> ] | 0,2                       | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0                   |

Ce cas particulier des tableaux 6.2 et 6.3 montre une concordance parfaite des résultats issus du logiciel et ceux des abaques.

Considérons maintenant une pièce de  $6\text{m} \times 10\text{m} \times 4\text{m}$ . Les tableaux 6.4 et 6.5 montrent les résultats issus du logiciel et ceux issus des abaques alors que le tableau 6.6 montre l'erreur relative entre ces résultats.

**Tableau 6.4 :** Résultats issus du logiciel pour une pièce de  $6\text{m} \times 10\text{m} \times 4\text{m}$

| Surface $i$ | Surface $j$          | 1                         | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    |
|-------------|----------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|             | Aire de la surface   | 24 [m <sup>2</sup> ]      | 40 [m <sup>2</sup> ] | 24 [m <sup>2</sup> ] | 40 [m <sup>2</sup> ] | 60 [m <sup>2</sup> ] | 60 [m <sup>2</sup> ] |
|             |                      | Facteur de forme $F_{ij}$ |                      |                      |                      |                      |                      |
| 1           | 24 [m <sup>2</sup> ] | 0                         | 0,175                | 0,102                | 0,175                | 0,274                | 0,274                |
| 2           | 40 [m <sup>2</sup> ] | 0,106                     | 0                    | 0,106                | 0,187                | 0,3                  | 0,3                  |
| 3           | 24 [m <sup>2</sup> ] | 0,102                     | 0,175                | 0                    | 0,175                | 0,274                | 0,274                |
| 4           | 40 [m <sup>2</sup> ] | 0,106                     | 0,187                | 0,106                | 0                    | 0,3                  | 0,3                  |
| 5           | 60 [m <sup>2</sup> ] | 0,114                     | 0,21                 | 0,114                | 0,21                 | 0                    | 0,351                |
| 6           | 60 [m <sup>2</sup> ] | 0,114                     | 0,21                 | 0,114                | 0,21                 | 0,351                | 0                    |

**Tableau 6.5 :** Résultats des abaques pour une pièce de 6m × 10m × 4m

| Surface <i>i</i> | Surface <i>j</i>     | 1                         | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    |
|------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                  | Aire de la surface   | 24 [m <sup>2</sup> ]      | 40 [m <sup>2</sup> ] | 24 [m <sup>2</sup> ] | 40 [m <sup>2</sup> ] | 60 [m <sup>2</sup> ] | 60 [m <sup>2</sup> ] |
|                  |                      | Facteur de forme $F_{ij}$ |                      |                      |                      |                      |                      |
| 1                | 24 [m <sup>2</sup> ] | 0                         | 0,185                | 0,08                 | 0,185                | 0,275                | 0,275                |
| 2                | 40 [m <sup>2</sup> ] | 0,11                      | 0                    | 0,11                 | 0,21                 | 0,285                | 0,285                |
| 3                | 24 [m <sup>2</sup> ] | 0,08                      | 0,185                | 0                    | 0,185                | 0,275                | 0,275                |
| 4                | 40 [m <sup>2</sup> ] | 0,11                      | 0,21                 | 0,11                 | 0                    | 0,285                | 0,285                |
| 5                | 60 [m <sup>2</sup> ] | 0,11                      | 0,2                  | 0,11                 | 0,2                  | 0                    | 0,375                |
| 6                | 60 [m <sup>2</sup> ] | 0,11                      | 0,2                  | 0,11                 | 0,2                  | 0,375                | 0                    |

**Tableau 6.6 :** Erreurs relatives entre les résultats pour une pièce de 6m × 10m × 4m

| Surface <i>i</i> | Surface <i>j</i>     | 1                                            | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    |
|------------------|----------------------|----------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                  | Aire de la surface   | 24 [m <sup>2</sup> ]                         | 40 [m <sup>2</sup> ] | 24 [m <sup>2</sup> ] | 40 [m <sup>2</sup> ] | 60 [m <sup>2</sup> ] | 60 [m <sup>2</sup> ] |
|                  |                      | Erreur relative du facteur de forme $F_{ij}$ |                      |                      |                      |                      |                      |
| 1                | 24 [m <sup>2</sup> ] | NA                                           | 5%                   | -28%                 | 5%                   | 0%                   | 0%                   |
| 2                | 40 [m <sup>2</sup> ] | 4%                                           | NA                   | 4%                   | 11%                  | -5%                  | -5%                  |
| 3                | 24 [m <sup>2</sup> ] | -28%                                         | 5%                   | NA                   | 5%                   | 0%                   | 0%                   |
| 4                | 40 [m <sup>2</sup> ] | 4%                                           | 11%                  | 4%                   | NA                   | -5%                  | -5%                  |
| 5                | 60 [m <sup>2</sup> ] | -4%                                          | -5%                  | -4%                  | -5%                  | NA                   | 6%                   |
| 6                | 60 [m <sup>2</sup> ] | -4%                                          | -5%                  | -4%                  | -5%                  | 6%                   | NA                   |

Si les erreurs pour les facteurs de formes entre les surfaces perpendiculaires sont relativement faibles, elles sont assez importantes pour les cas des murs parallèles. En effet, l'approche de calcul ne tient pas compte de la distance entre les surfaces

parallèles. Une deuxième validation sera alors utile pour quantifier l'erreur encourue en utilisant ces facteurs de forme.

#### 6.1.3.4.2 Validation énergétique

Le paragraphe précédent a clairement montré que l'utilisation de facteurs de forme approximatifs pouvait parfois engendrer des erreurs appréciables lorsque comparé à la forme exacte des facteurs de forme. Cependant, comme le démontrent les calculs qui suivent ces erreurs n'ont pas nécessairement d'impact significatif sur le calcul des besoins en chauffage/climatisation.

##### 1. Méthodologie

L'étude suivante se réfère à deux pièces parallélépipédiques montrées aux Figure 6.5 et 6.6. L'objectif est de montrer que l'utilisation des facteurs de formes approximatifs est adéquate pour évaluer les besoins en chauffage/climatisation.

##### Pièce 1 :

Considérons un cas simple d'une pièce comportant quatre murs extérieurs, un toit et un plancher. Ce dernier sépare la pièce considérée d'une pièce adjacente (Figure 6.5). La température extérieure,  $T_{ext}$ , est constante et égale à 5°C et les gains solaires sont supposés nuls. La température de consigne intérieure,  $T_{int}$ , est de 18°C.

Ainsi, les températures sol-air des murs et du toit, dénotées ici par  $T_{e,m}$ ,  $T_{e,t}$  valent :

- pour les murs  $T_{e,m} = T_{ext}$
- pour le toit  $T_{e,t} = T_{ext} - 4^{\circ}\text{C}$

En utilisant la terminologie des matériaux de ASHRAE (1997), la composition de l'enveloppe de la pièce est la suivante :

Murs : A2-B16-E1 (brique de façade 100mm - isolant 4mm - panneau de gypse 20mm)

Toit : B7-B16-E1 (bois 25mm - isolant 4mm - panneau de gypse 20mm)

Plancher : E1-C12-E1 (panneau de gypse 20mm - béton haute densité 50mm - panneau de gypse 20mm)

### **Pièce 2 :**

Considérons maintenant une pièce d'un appartement, comportant deux murs extérieurs et deux murs de cloison (Figure 6.6). Les gains solaires sont considérés nuls, ce qui fait que les températures sol-air pour les deux murs extérieurs sont égales à la température extérieure. Quant aux deux murs de cloison, leurs surfaces extérieures sont sujettes à un coefficient de film (convection et rayonnement) égal à  $5 \text{ W/m}^2\text{.K}$ . Les températures  $T_{adj,1}$ ,  $T_{adj,2}$  et  $T_{adj,3}$  des pièces adjacentes sont fixées à  $20^\circ\text{C}$ . Les cloisons sont composées des matériaux E1-B16-E1 (panneau de gypse - 20mm - isolant 4mm - panneau de gypse 20mm) alors que les murs extérieurs, le toit et le plancher sont identiques à la pièce 1.

Pour les deux modèles étudiés, le coefficient de convection intérieur vaut  $5 \text{ W/m}^2\text{.K}$  et les surfaces ont une émissivité de 0,9.

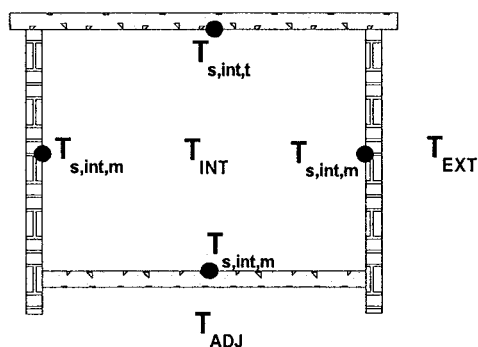


**Figure 6.5 :** Pièce 1 utilisée pour la validation du calcul des facteurs de forme

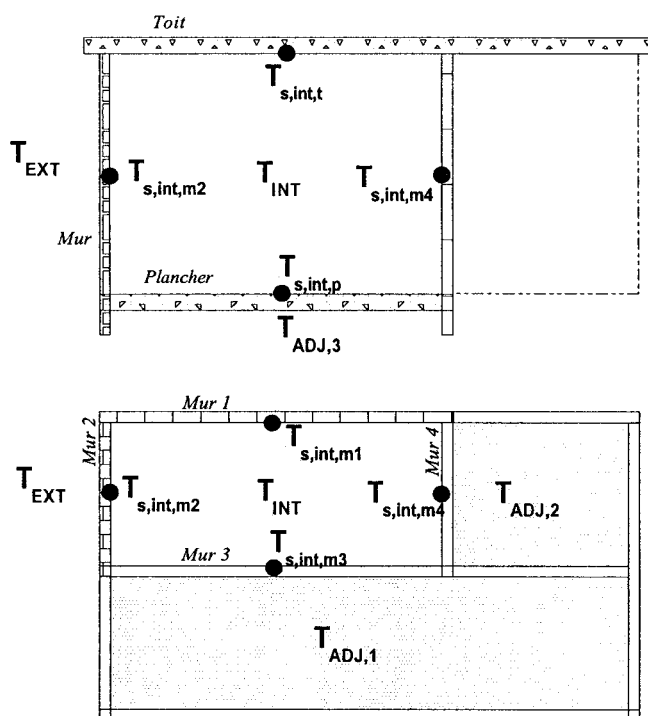


**Figure 6.6 :** Pièce 2 utilisée pour la validation du calcul des facteurs de forme

Pour ces deux modèles de pièce, trois dimensions types sont étudiées pour évaluer les erreurs encourues lors de l'utilisation des facteurs de forme approximatifs. Ces dimensions sont :

- $6\text{m} \times 4\text{m} \times 2,5\text{m}$  (s'apparente à une chambre)
- $30\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$  (s'apparente à un corridor)
- $30\text{m} \times 30\text{m} \times 3\text{m}$  (s'apparente à un entrepôt)

## 2. Résultats

L'approche consiste à comparer les valeurs obtenues par l'utilisation des facteurs de forme approximatifs (équations 6.9 et 6.21) et les valeurs exactes données par les équations analytiques (équation 6.5). Deux valeurs seront comparées :

- l'échange radiatif au niveau de chaque paroi
- les besoins en chauffage/climatisation

Les gains radiatifs nets au niveau de chacune des parois sont calculés par les équations (6.1) à (6.4). Ces dernières permettent d'obtenir les températures des surfaces intérieures qui elles-mêmes permettent de déterminer les besoins de la pièce:

$$Q_{\text{besoin}} = \sum_{i=1}^6 h_{\text{int}} (T_{\text{s-int},i} - T_{\text{int}}) \quad (6.22)$$

où

- $h_{\text{int}}$  est le coefficient de convection au niveau des surfaces internes,  $\text{W/m}^2.\text{K}$
- $T_{\text{s-int},i}$  est la température de surface interne  $i$  de l'enveloppes,  $^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{int}}$  est la température de l'air à l'intérieur de la pièce,  $^{\circ}\text{C}$

Dans ce qui suit, les termes « exact » et « approximatif » réfèrent aux facteurs de forme obtenus par les formulations analytiques et ceux obtenus par la méthode approximative

(approche améliorée). Les tableaux 6.7 à 6.10 rapportent les résultats obtenus pour les cas de pièce 1.

### **Pièce 1** (Figure 6.5)

#### ***Chambre***

**Tableau 6.7 : Bilan radiatif pour une chambre (pièce 1)**

| <b>Surface</b> | <b>Aire,<br/>m<sup>2</sup></b> | <b>Bilan radiatif<br/>exact,<br/>W</b> | <b>Bilan radiatif<br/>approximatif,<br/>W</b> | <b>Erreur<br/>relative</b> |
|----------------|--------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| Mur 1          | 15                             | -83,37                                 | -83,85                                        | 0,58%                      |
| Mur 2          | 10                             | -54,61                                 | -53,56                                        | -1,92%                     |
| Mur 3          | 15                             | -83,37                                 | -83,85                                        | 0,58%                      |
| Mur 4          | 10                             | -54,61                                 | -53,56                                        | -1,92%                     |
| Toit           | 24                             | -135,5                                 | -124,9                                        | -7,82%                     |
| Plancher       | 24                             | 411,5                                  | 413,8                                         | 0,56%                      |

#### ***Corridor***

**Tableau 6.8 : Bilan radiatif pour un corridor (pièce 1)**

| <b>Surface</b> | <b>Aire,<br/>m<sup>2</sup></b> | <b>Bilan radiatif<br/>exact,<br/>W</b> | <b>Bilan radiatif<br/>approximatif,<br/>W</b> | <b>Erreur<br/>relative</b> |
|----------------|--------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| Mur 1          | 9                              | -45,15                                 | -44,57                                        | -1,28%                     |
| Mur 2          | 90                             | -484,96                                | -516,38                                       | 6,48%                      |
| Mur 3          | 9                              | -45,15                                 | -44,57                                        | -1,28%                     |
| Mur 4          | 90                             | -484,96                                | -516,38                                       | 6,48%                      |
| Toit           | 90                             | -489,76                                | -433                                          | -11,59%                    |
| Plancher       | 90                             | 1550                                   | 1555                                          | 0,32%                      |

**Entrepôt****Tableau 6.9 : Bilan radiatif pour un entrepôt (pièce 1)**

| <b>Surface</b> | <b>Aire,<br/>m<sup>2</sup></b> | <b>Bilan radiatif<br/>exact,<br/>W</b> | <b>Bilan radiatif<br/>approximatif,<br/>W</b> | <b>Erreur<br/>relative</b> |
|----------------|--------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| Mur 1          | 90                             | -825,6                                 | -827,7                                        | 0,25%                      |
| Mur 2          | 90                             | -825,6                                 | -827,7                                        | 0,25%                      |
| Mur 3          | 90                             | -825,6                                 | -827,7                                        | 0,25%                      |
| Mur 4          | 90                             | -825,6                                 | -827,7                                        | 0,25%                      |
| Toit           | 900                            | -10105                                 | -9996                                         | -1,08%                     |
| Plancher       | 900                            | 13 407                                 | 13 454                                        | 0,35%                      |

Le tableau suivant reporte les charges des trois bâtiments-types pour la pièce 1 de la Figure 6.5.

**Tableau 6.10 : Comparaison des charges exacte et approximative des bâtiments (pièce1)**

| <b>Type de la pièce</b> | <b>Besoins <i>méthode</i><br/>exacte,<br/>W</b> | <b>Besoins<br/><i>méthode</i><br/>approximative,<br/>W</b> | <b>Erreur encourue<br/>en utilisant la<br/>méthode<br/>approximative</b> |
|-------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Chambre                 | 2467                                            | 2462                                                       | -0,20%                                                                   |
| Corridor                | 9599                                            | 9608                                                       | 0,09%                                                                    |
| Entrepôt                | 41 371                                          | 41 326                                                     | -0,11%                                                                   |

Les tableaux 6.11 à 6.14 qui suivent rapportent les résultats obtenus pour les cas de pièce 2.

**Pièce 2** (Figure 6.6)**Chambre****Tableau 6.11** : Bilan radiatif pour une chambre (pièce 2)

| Surface  | Aire,<br>m <sup>2</sup> | Bilan radiatif<br>exact,<br>W | Bilan radiatif<br>approximatif,<br>W | Erreur<br>relative |
|----------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Mur 1    | 15                      | -186,9                        | -186,7                               | -0,11%             |
| Mur 2    | 10                      | -118                          | -120,3                               | 1,95%              |
| Mur 3    | 15                      | 190,5                         | 190,2                                | -0,16%             |
| Mur 4    | 10                      | 121,1                         | 123                                  | 1,57%              |
| Toit     | 24                      | -288,5                        | -284,7                               | -1,32%             |
| Plancher | 24                      | 281,9                         | 278,1                                | -1,35%             |

**Corridor****Tableau 6.12** : Bilan radiatif pour un corridor (pièce 2)

| Surface  | Aire,<br>m <sup>2</sup> | Bilan radiatif<br>exact,<br>W | Bilan radiatif<br>approximatif,<br>W | Erreur<br>relative |
|----------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Mur 1    | 9                       | -101,4                        | -103,2                               | 1,78%              |
| Mur 2    | 90                      | -1224,8                       | -1193                                | -2,60%             |
| Mur 3    | 9                       | 105,6                         | 106,2                                | 0,57%              |
| Mur 4    | 90                      | 1240,3                        | 1209                                 | -2,52%             |
| Toit     | 90                      | -1073,7                       | -1050                                | -2,21%             |
| Plancher | 90                      | 1054                          | 1030                                 | -2,28%             |

**Entrepôt****Tableau 6.13 : Bilan radiatif pour un entrepôt (pièce 2)**

| <b>Surface</b> | <b>Aire,<br/>m<sup>2</sup></b> | <b>Bilan radiatif<br/>exact,<br/>W</b> | <b>Bilan radiatif<br/>approximatif,<br/>W</b> | <b>Erreur<br/>relative</b> |
|----------------|--------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| Mur 1          | 90                             | -1016                                  | -1027                                         | 1,08%                      |
| Mur 2          | 90                             | -1016                                  | -1027                                         | 1,08%                      |
| Mur 3          | 90                             | 1077                                   | 1087                                          | 0,93%                      |
| Mur 4          | 90                             | 1077                                   | 1087                                          | 0,93%                      |
| Toit           | 900                            | -11 973                                | -11 951                                       | -0,18%                     |
| Plancher       | 900                            | 11 851                                 | 11 826                                        | -0,21%                     |

Les besoins des trois bâtiments-types pour le modèle 2 sont reportées sur le tableau suivant.

**Tableau 6.14 : Comparaison des charges exacte et approximative des bâtiments (pièce 2)**

| <b>Type de la pièce</b> | <b>Besoins<br/><i>méthode exacte,</i><br/><br/>W</b> | <b>Besoins <i>méthode<br/>approximative,</i><br/><br/>W</b> | <b>Erreur encourue<br/>en utilisant la<br/>méthode<br/>approximative</b> |
|-------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Chambre                 | 1533                                                 | 1533                                                        | <b>0,00%</b>                                                             |
| Corridor                | 5928                                                 | 5919                                                        | <b>0,15%</b>                                                             |
| Entrepôt                | 34 326                                               | 34 325                                                      | <b>0,00%</b>                                                             |

Les résultats de cette comparaison montre que l'erreur sur les facteurs de forme est moindre si les écarts entre les dimensions de la pièce (longueur, largeur et hauteur) sont faibles. Elle est significative lorsque la distance entre deux surfaces parallèles est

relativement grande ou relativement petite par rapport aux deux autres dimensions. Ceci est dû au fait que l'approximation ne tient compte que des aires des surfaces de l'enceinte.

Cependant, en faisant la validation énergétique, nous trouvons que, dans les trois types de bâtiments étudiés (chambre, corridor, entrepôt), l'utilisation de la méthode approximative engendre des erreurs relatives sur les besoins en chauffage/climatisation inférieures à 0,2%. Par conséquent, compte tenu cette faible erreur, tous les calculs radiatifs se feront en utilisant la méthode approximative.

## 6.2 Convection à la surface interne

Cette section examine les coefficients d'échange par convection sur les surfaces internes. La plupart des corrélations retrouvées dans la littérature peuvent se réduire à la forme générale suivante :

$$h = A + C \left( |T_s - T_\infty| \right)^N \quad (6.23)$$

où

- $h$ , coefficient de convection,  $\text{W/m}^2.\text{K}$
- $A$ , une constante
- $C$ , une constante
- $N$ , un exposant
- $T_s$ , la température de surface,  $^{\circ}\text{C}$
- $T_\infty$ , la température de l'air ambiant,  $^{\circ}\text{C}$

Des nombreuses études ont été effectuées pour établir des relations adéquates permettant de prédire les coefficients de convection  $h$ . Ainsi, Beausoleil-Morrison (2000) examina différentes possibilités du modèle simple à coefficient de convection constant jusqu'à un modèle complexe intégrant des calculs de CFD. Cependant, tel que mentionné par Rees et al. (1999), il n'existe pas de coefficient ou corrélation universellement acceptable pour toutes les situations. Conséquemment, les choix des relations adoptées pour le calcul des coefficients de convection sont dictés par le degré de précision désiré.

Le logiciel B5EES offre à l'utilisateur deux possibilités quant au calcul des coefficients de convection à la surface. Un coefficient fixe ou un coefficient basé sur la méthode de Alamdari-Hammond (Beausoleil-Morrison, 2000). Il est à noter que la méthode de Alamdari-Hammond a été une des premières à avoir été développée spécialement pour les applications dans les bâtiments. Elle est utilisée dans de nombreux programmes de simulation commerciaux tels que ESP-r, APACHE et TASE.

Les différentes corrélations de la méthode de Alamdari-Hammond sont :

Pour une surface verticale,

$$h = \left\{ \left[ 1,5 \left( \frac{\Delta T}{H} \right)^{1/4} \right]^6 + \left[ 1,23 \Delta T^{1/3} \right]^6 \right\}^{1/6} \quad (6.24)$$

Pour une surface horizontale avec écoulement de la chaleur flottant,

$$h = \left\{ \left[ 1,4 \left( \frac{\Delta T}{D_h} \right)^{1/4} \right]^6 + \left[ 1,63 \Delta T^{1/3} \right]^6 \right\}^{1/6} \quad (6.25)$$

Pour une surface horizontale avec écoulement de la chaleur stablement stratifié,

$$h = 0,6 \left( \frac{\Delta T}{D_h^2} \right)^{1/5} \quad (6.26)$$

où

- $h$ , coefficient de convection,  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )
- $\Delta T$  est la valeur absolue de la différence de température surface-air,  $^{\circ}\text{C}$
- $H$ , la hauteur des surfaces verticales, m
- $D_h$ , le diamètre hydraulique des surfaces horizontales, m

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (6.27)$$

où

- $A$  est l'aire de la surface considérée,  $\text{m}^2$
- $P$  est son périmètre, m

Lorsque l'utilisateur choisit la méthode de Alamdari-Hammond (Beausoleil-Morrison, 2000) ceci engendre un couplage entre les équations des coefficients de convection et le calcul du transfert thermique transitoire dans les murs et l'évaluation de la température de l'air. Ceci donne évidemment des coefficients différents pour chacune des surfaces, dépendamment de leurs températures et de leurs orientations. Par ailleurs, cette méthode s'exécute plus lentement que la méthode aux coefficients fixes, suite aux processus itératifs reliant les températures des surfaces et les coefficients de convection et au grand nombre de coefficient à évaluer (30 coefficients pour un bâtiment de cinq zones).

## **CHAPITRE 7**

### **GAINS INTERNES**

#### **7.1 Introduction**

L'analyse des gains internes, présentée dans ce chapitre, complète la description mathématique des phénomènes thermiques menant à la détermination des besoins d'un bâtiment.

#### **7.2 Sources de gains internes**

Les sources de chaleur situées dans un espace conditionné, que l'on désigne généralement sous l'appellation « gains internes » peuvent être classées en trois catégories :

- les occupants
- l'éclairage
- les équipements.

Selon le type de gains internes, le transfert de chaleur vers la pièce se fait par convection et rayonnement dans des proportions différentes. Les portions convectives participent instantanément aux besoins alors que les portions radiatives seront absorbées par les surfaces à l'intérieur de la pièce avant d'être transformées en besoins de climatisation ultérieurement.

Les choix proposés dans le logiciel B5EES dans les menus tombants sont des extraits de trois références (ASHRAE, 1997 ; Komor, 1997 ; Wilkins et Hosni, 2000). La fenêtre de la figure 7.1 montre un aperçu général du module des gains internes de B5EES.

| GAINS INTERNES                    |                      |                                                           |                                                        |                                                         |             |             |  |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------|-------------|--|
|                                   | Personnes            |                                                           | Éclairage                                              |                                                         | Équipements |             |  |
| ZONE 1<br>325.0 [m <sup>2</sup> ] | Densité d'occupation | faible<br>0.05 [pers/m <sup>2</sup> ]<br>110.0 [W/pers]   | -autre-<br>20.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>80 [% radiatif] | moyen<br>15.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>27 [% radiatif]    | radiatif :  | 6081.4 [W]  |  |
|                                   | Tâche des occupants  | modérée<br>40 [% radiatif]                                |                                                        |                                                         | convectif : | 7081.1 [W]  |  |
|                                   |                      | 1787.5 [W]                                                | 6500.0 [W]                                             | 4875.0 [W]                                              | total :     | 13182.5 [W] |  |
| ZONE 2<br>325.0 [m <sup>2</sup> ] | Densité d'occupation | très dense<br>0.5 [pers/m <sup>2</sup> ]<br>70.0 [W/pers] | élevé<br>19.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>80 [% radiatif]   | --autre--<br>8.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>27 [% radiatif] | radiatif :  | 11116.0 [W] |  |
|                                   | Tâche des occupants  | légère<br>60 [% radiatif]                                 |                                                        |                                                         | convectif : | 9001.5 [W]  |  |
|                                   |                      | 11375.0 [W]                                               | 5850.0 [W]                                             | 2892.5 [W]                                              | total :     | 20117.5 [W] |  |

**Figure 7.1 :** Fenêtre du module gains internes

### 7.2.1 Occupants

Le corps humain dégage de la chaleur sensible et de l'humidité dont les valeurs dépendent du niveau d'activité. Dans la présente étude, l'humidité n'est pas considérée. Nous ne tenons compte que de la chaleur sensible qui est échangée par convection avec l'air intérieur et par rayonnement avec les surfaces environnantes.

Les besoins totaux provenant des occupants sont obtenus en multipliant les besoins individuels par le nombre de personnes dans la pièce, tout en supposant que les occupants de la zone font les mêmes activités. Le taux d'occupation dépend de la vocation de chaque pièce. Ainsi, une chambre a généralement une densité d'occupation de 0,02 personne/m<sup>2</sup> alors que pour une salle de cinéma elle peut atteindre 1,5 personnes/m<sup>2</sup>.

Les gains internes dus aux occupants,  $Q_{occ}$ , sont donc donnés par :

$$Q_{occ} = Q_{pax} \tau_{occ} S \quad (7.1)$$

où

- $Q_{pax}$  est la chaleur sensible dégagée par individu pour une activité donnée, W/individu
- $\tau_{occ}$  est le taux d'occupation de la salle, individu/m<sup>2</sup>
- $S$  est la surface de la salle occupée, m<sup>2</sup>.

Selon l'activité des occupants, la portion radiative de ces gains de chaleur peut varier entre 49% et 60% pour un faible mouvement d'air autour des occupants et entre 19% et 35% pour une vitesse élevée de l'air autour des occupants (ASHRAE, 1997).

B5EES suggère trois options de choix dans le menu tombant relié à l'activité des occupants (Figure 7.2)

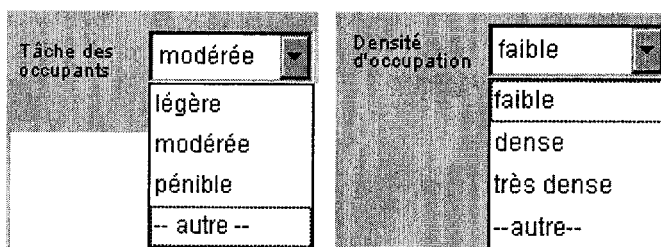


**Figure 7.2 :** Menus de sélection des activités des occupants et des densités d'occupation des zones

**Tableau 7.1. : Activités des occupants**

| Activités des occupants                   | Chaleur sensible<br>dégagée par une<br>personne, W | Portion<br>radiative de la<br>chaleur, % |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Légère (assis, travail léger)             | 70                                                 | 60                                       |
| Modérée (danse modérée, marche à 4,8km/h) | 110                                                | 49                                       |
| Pénible (athlète, travail lourd)          | 185                                                | 54                                       |

### 7.2.2 Éclairage

La part de l'éclairage dans les besoins de climatisation est souvent très élevée. Ce paragraphe rapporte comment les gains par l'éclairage sont pris en compte (Mitalas, 1973 ; ASHRAE, 1997). En moyenne, dans un immeuble à bureaux, le gain par l'éclairage est de  $14\text{W/m}^2$  avec une proportion de 60% d'énergie radiative (ASHRAE, 2001).

La chaleur totale dégagée par l'éclairage dans une pièce de surface  $S$  sera alors donnée par :

$$Q_{\text{écl}} = q_{\text{écl}} S \quad (7.2)$$

où

- $q_{\text{écl}}$  est le gain thermique par l'éclairage par unité de surface de la pièce,  $\text{W/m}^2$
- et  $S$  la surface de la salle éclairée,  $\text{m}^2$ .

Le logiciel B5EES fournit des valeurs par défaut de  $q_{\text{écl}}$ , ainsi que sa portion radiative, mais il prévoit aussi l'option « autre » pour des valeurs différentes.

### 7.2.3 Équipements

Cette catégorie est composée des appareils situés dans la pièce et qui nécessitent une source d'énergie pour fonctionner. Cette énergie se retrouve sous forme de chaleur. Tout comme pour l'éclairage, les gains par les équipements sont introduits dans le logiciel en utilisant une puissance par unité de surface. Il est à noter qu'il est erroné de faire le cumul des puissances inscrites sur les plaques signalétiques des appareils pour déterminer les gains dus aux équipements car ceux-ci fonctionnent rarement à pleine capacité sans compter qu'il y a un phénomène de diversités des charges.

Le logiciel, se basant sur les travaux de Komor (1997), fournit donc trois options pour les équipements et l'option « autre » pour des valeurs différentes.

**Tableau 7.2 :** Gains internes dus aux équipements (Komor, 1997)

| Équipements                         | Chaleur dégagée par les équipements, W/m <sup>2</sup> | Portion radiative de la chaleur, % |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|
| peu (bureau normal)                 | 13                                                    | 20                                 |
| moyen (département de comptabilité) | 22                                                    | 25                                 |
| beaucoup (salle informatique)       | 47                                                    | 26,8                               |

La chaleur totale dégagée par les équipements dans une pièce de surface  $S$  sera alors :

$$Q_{\text{éq}} = q_{\text{éq}} S \quad (7.3)$$

où

- $q_{\text{equ}}$  est le gain thermique par les équipements par unité de surface,  $\text{W/m}^2$
- $S$  est la surface de la salle équipée,  $\text{m}^2$ .

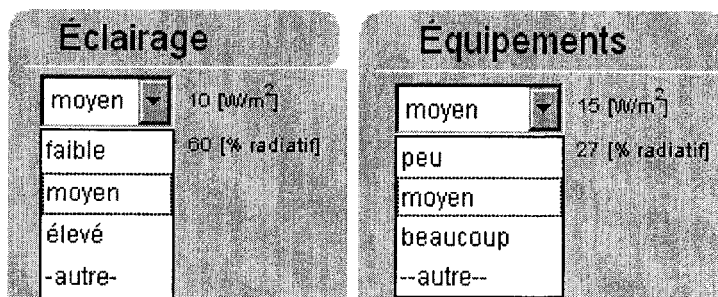


**Figure 7.3 :** Menus de sélection des gains par éclairage et par les équipements

### 7.3 Profil d'occupation

La densité d'occupation, la densité d'éclairage ainsi que la quantité d'équipements en marche sont fonction de l'heure du jour et du type de jour (jour de semaine ou jour de fin de semaine). Pour tenir compte de ses variations, le logiciel permet d'établir un profil d'occupation qui tient compte des fonctionnements réduits pendant la nuit et la fin de semaine.

La constitution du profil d'occupation est effectuée dans le logiciel avec la fenêtre ci-dessous.

| SCÉNARIO D'OCCUPATION |                                                   |
|-----------------------|---------------------------------------------------|
| SEMAINE               | Début de l'occupation à : 8 heure(s)              |
|                       | Fin de l'occupation à : 19 heure(s)               |
|                       | Taux d'occupation maximal : 100 %                 |
|                       | Taux d'occupation réduit : 20 %                   |
| WEEKEND               | Taux d'occupation réduit en fin de semaine : 10 % |

**Figure 7.4 :** Fenêtre de constitution du profil d'occupation

La semaine commence le lundi à 1 heure du matin alors que la fin de semaine est constituée des journées de samedi et dimanche.

Pour les jours de la semaine, l'utilisateur spécifie les heures de début et de fin de l'occupation du bâtiment, ainsi que le taux de fonctionnement réduit pendant les heures hors occupation. Pour la fin de semaine, seul le taux de fonctionnement réduit en fin de semaine est saisi. Par exemple, en utilisant les données présentées à la Figure 7.4, le profil d'occupation présentée à la figure 7.5 est obtenu.

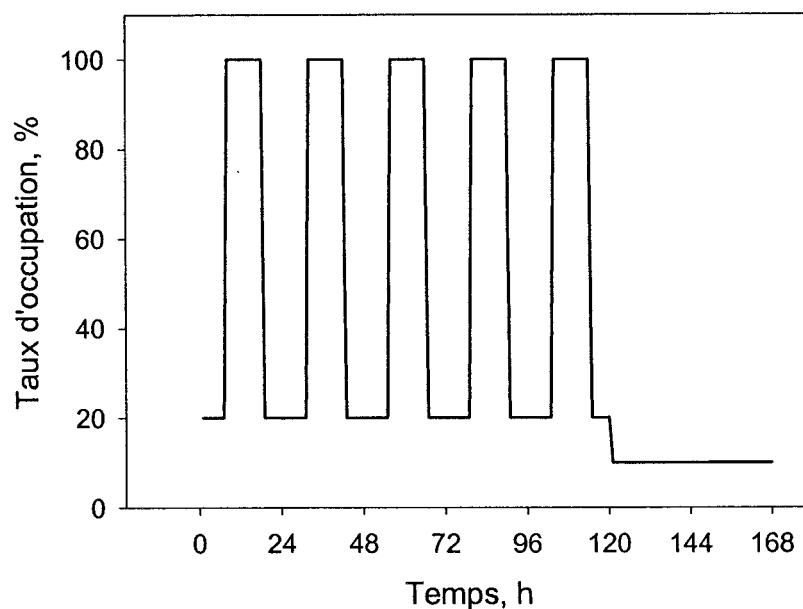


**Figure 7.5 :** Profil d'occupation d'un bâtiment pour une semaine

Le profil d'occupation saisi est identique pour les cinq zones. Ainsi pour une zone, le gain interne total déterminé dans le paragraphe précédent sera la valeur maximale du profil. Les valeurs des niveaux réduits sont obtenues en multipliant cette valeur maximale par le profil d'occupation.

Pour illustrer cette approche, prenons une zone ayant 720 W de gains internes dont 30% sont radiatifs. La charge radiative maximale sera ainsi  $720 \times 0,3 = 216$  W et la charge convective maximale 504 W. Si le bâtiment a le profil d'occupation de la figure 7.5, la charge convective vaut  $504 \times 0,2 = 100,8$  W à la fin de la journée et  $504 \times 0,1 = 50,4$  W la fin de la semaine. De la même manière, la charge radiative est de  $216 \times 0,2 = 43,2$  W à la fin de la journée et  $216 \times 0,1 = 21,6$  W à la fin de la semaine.

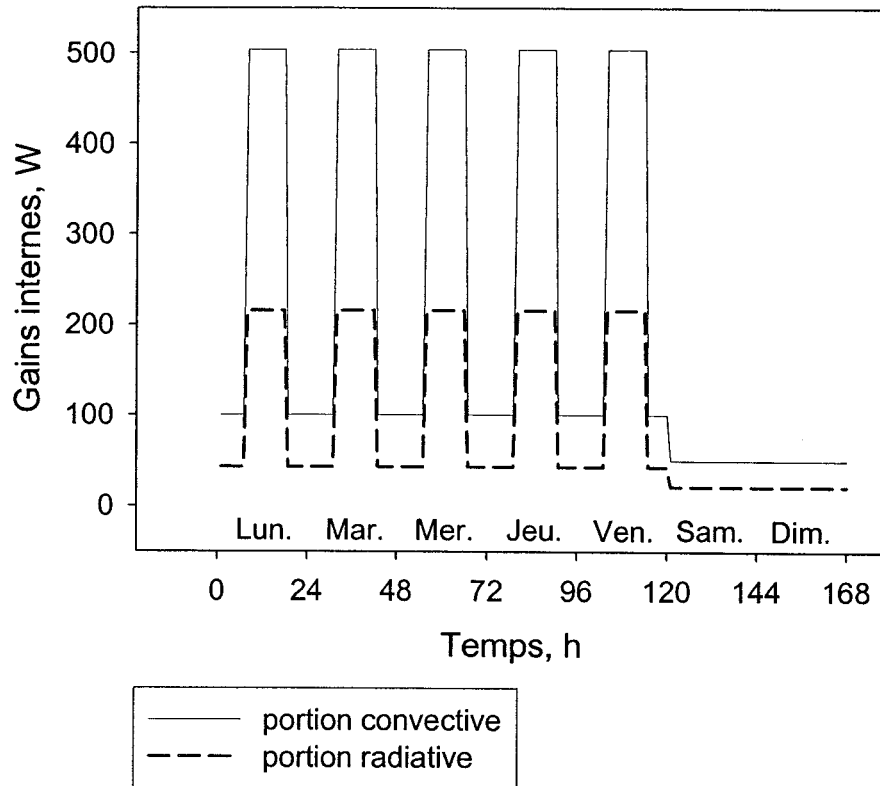


**Figure 7.6 :** Gains internes d'une zone pour une semaine

#### 7.4 Flux thermique dû aux gains internes

C'est avec les gains établis par ce profil que les besoins de chacune des zones sont calculés. Les gains internes dans une pièce sont la somme des trois gains mentionnés au paragraphe 7.2. En effet,

$$Q_{INT} = Q_{occ} + Q_{écl} + Q_{équ} \quad (7.4)$$

La portion radiative totale des gains est donnée par :

$$Q_{INT,rad} = \frac{Q_{occ}.rad_{occ} + Q_{écl}.rad_{écl} + Q_{équ}.rad_{équ}}{100} \quad (7.5)$$

où  $rad_{occ}$ ,  $rad_{écl}$ ,  $rad_{équ}$  sont respectivement les pourcentages radiatifs des gains des occupants, de l'éclairage et des équipements.

La portion convective des gains est déduite par :

$$Q_{INT,conv} = Q_{INT} - Q_{INT,rad} \quad (7.6)$$

La portion convective  $Q_{INT,conv}$  contribue instantanément aux besoins de la zone considérée. Quant à la portion radiative  $Q_{INT,rad}$ , elle est absorbée par les surfaces intérieures de l'enceinte. En posant comme hypothèse que  $Q_{INT,rad}$  est distribuée sur les surfaces proportionnellement à leurs aires  $S_i$ , on obtient :

$$Q_{INT,i} = Q_{INT,rad} \frac{S_i}{\sum_j S_j} \quad (7.7)$$

Le flux thermique  $Q_{INT,i}/S_i$  sera rajouté aux flux thermiques incidents  $q_B$  au nœud périphérique intérieur de l'équation (3.11) décrivant la conduction thermique transitoire au travers les surfaces opaques (cf. § 3.4.3).

## **CHAPITRE 8**

### **VALIDATION DU LOGICIEL B5EES**

#### **8.1 Introduction**

Ce chapitre traite de la validation du logiciel B5EES développé au cours de la présente étude. La littérature (Judkoff et Neymark, 1995) nous suggère une méthode de validation requérant trois sortes de tests, soit des vérifications analytiques, des validations empiriques, et des comparaisons interlogicielles.

Lors d'une vérification analytique, les résultats d'un programme ou d'une sous-routine sont comparés avec des résultats issus d'une solution analytique d'un phénomène physique (comme le transfert de chaleur dans un mur) soumis à des conditions de frontières relativement simples. Une validation empirique compare les résultats d'un programme ou d'une sous-routine avec des résultats relevés d'une structure réelle, d'une cellule expérimentale ou d'un test en laboratoire. Finalement, la comparaison interlogicielle implique une comparaison avec un autre logiciel possédant sensiblement les mêmes fonctionnalités mais pas nécessairement les mêmes modèles.

La présente étude fait appel à la première et à la troisième technique de validation.

#### **8.2 Validations analytiques**

Cette première étape de validation est très importante. Elle permet de détecter les erreurs commises lors de l'implémentation d'un modèle particulier. Elle permet également de juger du niveau de précision dans la résolution mathématique des modèles.

ASHRAE (2002) a développé récemment un outil efficace comprenant divers tests analytiques de référence. Cet outil, nommé *Analytical Verification Test Suite Software* (ASHRAE 1052-RP), comprend une foule de tests analytiques. Pour notre cas, cinq tests sont effectués dont trois tests de transfert thermique transitoire au travers les parois opaques (TC1-TC2 et TC3), un test sur les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes (IntLWRad) et un test concernant les gains internes (IntHeatGain).

### 8.2.1 Test 1 (TC1) : Conduction transitoire – une face adiabatique

L'objectif de ce test est de trouver la réponse thermique (en terme de température et flux au niveau des surfaces) d'une paroi soumise à un saut de température extérieure, et dont la surface interne est adiabatique. La Figure 8.1 illustre le cas traité.

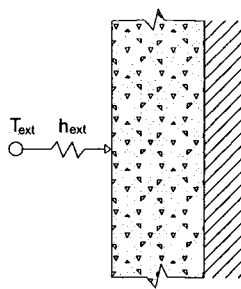


**Figure 8.1:** Illustration du test 1 - Conduction transitoire – une face adiabatique

Deux types de parois sont étudiés lors des tests qui suivent. La première est thermiquement légère et possède une résistante thermique élevée. Elle est constituée de cinq couches de tuile acoustique E5 dont les caractéristiques sont relatées dans le Tableau 8.1. La deuxième est plutôt conductrice et possède une masse thermique lourde. Tel que montré au Tableau 8.2, cette paroi est composée de cinq couches de béton haute densité C11.

**Tableau 8.1:** Propriétés thermophysiques de la paroi légère

|                                    |       |                   |
|------------------------------------|-------|-------------------|
| Épaisseur de la paroi              | 0,095 | m                 |
| Conductivité thermique de la paroi | 0,061 | W/m.K             |
| Masse volumique de la paroi        | 481   | kg/m <sup>3</sup> |
| Chaleur massique de la paroi       | 840   | J/kg.K            |

**Tableau 8.2 :** Propriétés thermophysiques de la paroi lourde

|                                    |       |                   |
|------------------------------------|-------|-------------------|
| Épaisseur de la paroi              | 1,5   | m                 |
| Conductivité thermique de la paroi | 1,731 | W/m.K             |
| Masse volumique de la paroi        | 2243  | kg/m <sup>3</sup> |
| Chaleur massique de la paroi       | 840   | J/kg.K            |

L'air extérieur ainsi que tous les noeuds du mur ont une température initiale de 10°C. L'amplitude du saut de température extérieure est de 30°C et la période est de 90 jours. Le coefficient de film extérieur est fixe et égal à 20 W/m<sup>2</sup>.K

Les figures 8.2 et 8.3 montrent les résultats du test TC1 pour une paroi légère et une paroi lourde. On y présente les variations de la température de surface interne de la paroi issues du logiciel B5EES et de la solution analytique. Rappelons ici que le pas de temps utilisés dans B5EES est de 1 heure.

### 8.2.1.1 Cas d'une paroi à masse thermique légère

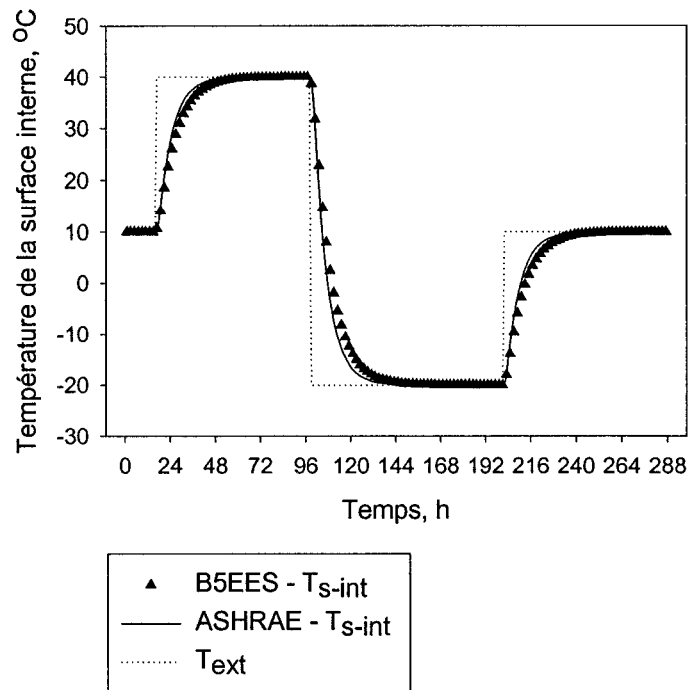


**Figure 8.2 :** Réponse d'une paroi légère, dont la face interne est adiabatique, pour un saut de température

Le test TC1 (ASHRAE, 2002) impose un test sur une période de 90 jours. Les figures 8.2 et 8.3 ne représentent qu'une portion de cette période. On a extrait quelques jours seulement (environ 3 jours) suivant un basculement de la température extérieure, pour rendre plus visible l'allure des courbes.

La figure 8.2 montre que les courbes des résultats issus de B5EES et de la solution analytique se concordent favorablement, avec une de moins de 8%.

### 8.2.1.2 Cas d'une paroi à masse thermique lourde

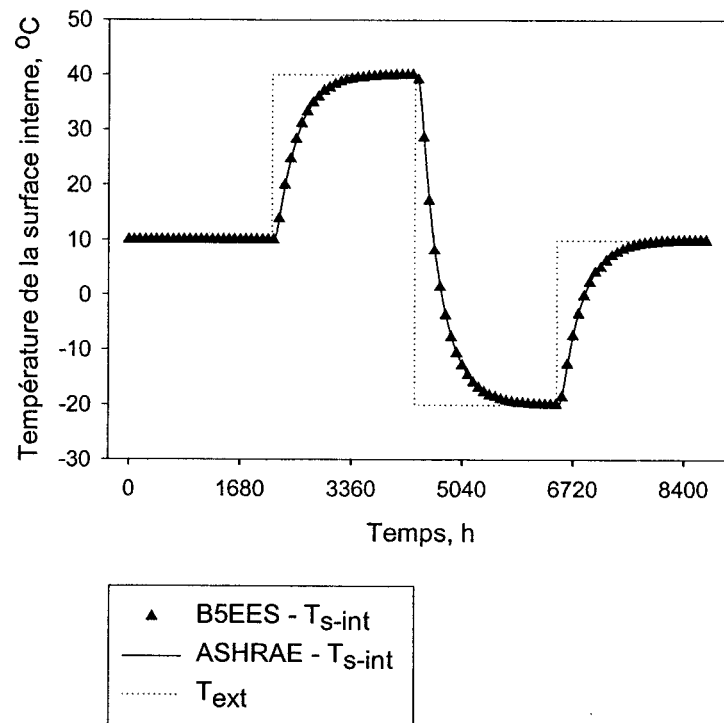


**Figure 8.3 :** Réponse d'une paroi lourde, dont la face interne est adiabatique, pour un saut de température

La Figure 8.3 montre une excellente correspondance des résultats de B5EES et du test TC1 pour la paroi à grande masse thermique. Ainsi, les courbes de B5EES et de la solution analytique sont superposées.

### 8.2.2 Test 2 (TC2) : Conduction transitoire – température intérieure maintenue constante

Tel qu'illustré à la Figure 8.4, ce test consiste à déterminer la réponse thermique d'une paroi suite à un saut de température extérieure pour une température intérieure constante.

Pour ce test on considère une enceinte de dimensions internes  $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ . Aucune fenêtre n'est présente et seulement une des six parois donne sur l'extérieur. Cette dernière est composée d'une seule couche dont la température initiale est égale à la température extérieure. La température intérieure est gardée constante et égale à la valeur initiale de la température extérieure.

Les effets de l'irradiation solaire, du rayonnement de grandes longueurs d'onde, de l'infiltration d'air et des gains internes sont éliminés. L'effet de l'orientation de la zone ainsi que tout paramètre relatif à son emplacement sont inutiles pour ce test.

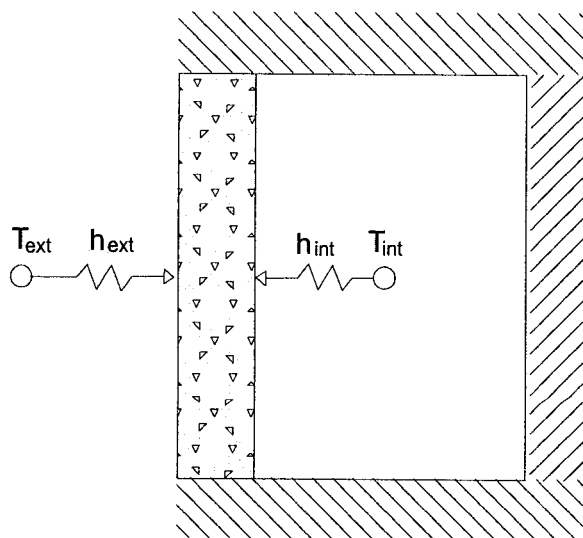


**Figure 8.4** : Test 2 - Enceinte à température intérieure fixe et dont une face est sollicitée à la température extérieure

Le test TC2 permet d'évaluer l'évolution des besoins d'une zone suite à un saut de la température extérieure. La température extérieure initiale est égale à 10°C, et la température à l'intérieur de la zone est fixée à cette température. Le saut de température est de 30°C et la période de variation est de 90 jours. Les coefficients de convection externe et interne sont, respectivement, 20 W/m<sup>2</sup>.K et 5 W/m<sup>2</sup>.K. Deux types de parois sont utilisés. Il s'agit de celles décrites aux tableaux 8.1 et 8.2.

### 8.2.2.1 Cas d'une paroi à masse thermique légère

Les Figure 8.5 à 8.7 présentent les résultats obtenus. La Figure 8.5 montre la variation de la température de la surface interne sur une période de 120 heures (figure de droite). La figure de gauche reprend les mêmes résultats mais pour une période plus courte s'étalant de  $t = 10$  à  $t = 26$  heures. La Figure 8.6 présente les résultats pour la surface externe et ce pour les mêmes intervalles de temps alors que la Figure 8.7 montre la variation des besoins toujours pour les mêmes intervalles de temps.

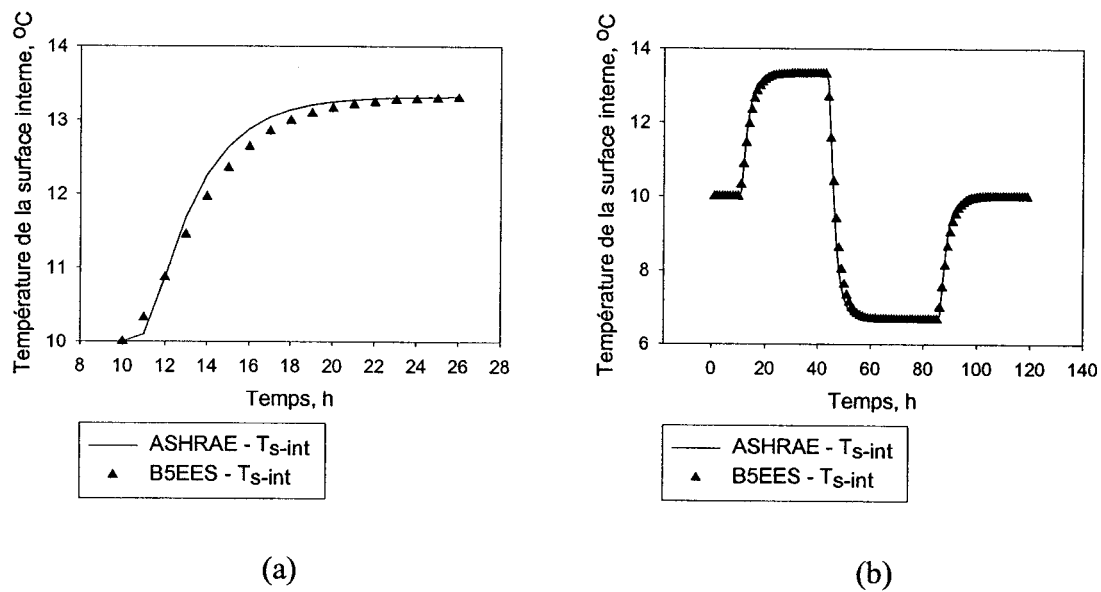


**Figure 8.5 :** Variation de la température de la surface interne d'une paroi légère

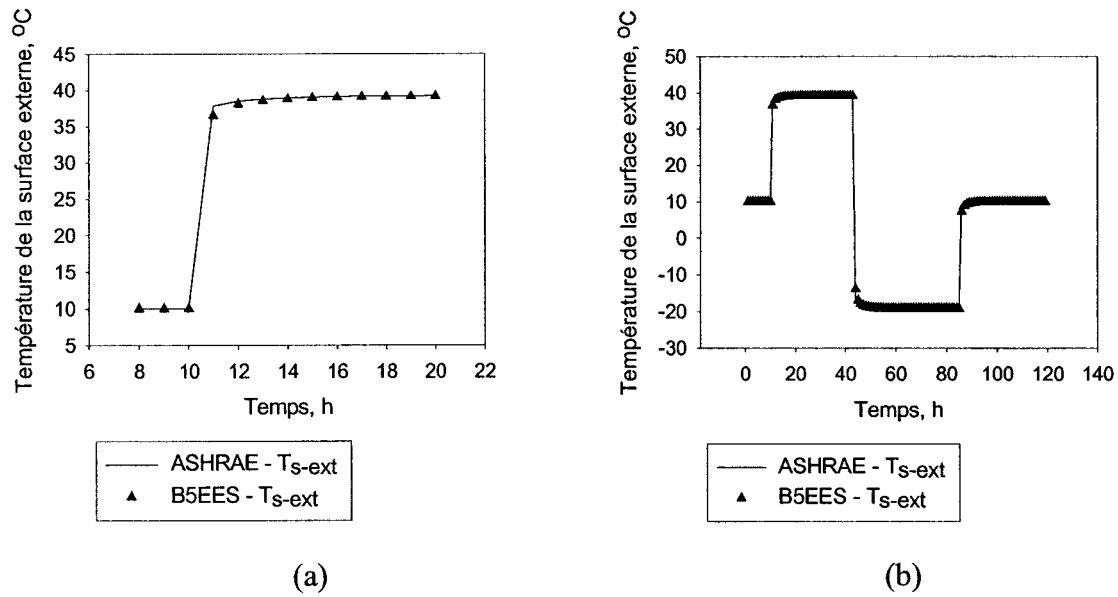


**Figure 8.6 :** Variation de la température de la surface externe d'une paroi légère

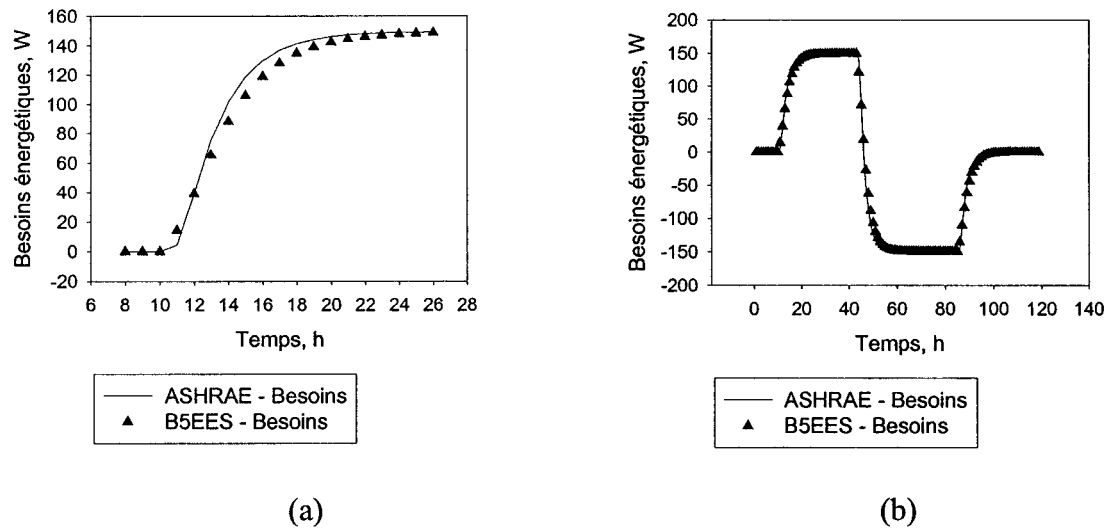


**Figure 8.7 :** Variation des besoins de l'enceinte à paroi légère

Ces figures montrent que les résultats de B5EES concordent bien avec les résultats analytiques du test TC2 (ASHRAE, 2002). Il existe des différences en ce qui a trait au

calcul des besoins. Cette différence se chiffre à environ 8%. Elle est probablement due au fait que B5EES utilise un pas de temps horaire.

### 8.2.2.2 Cas d'une paroi à masse thermique lourde

Les figures 8.8 à 8.10 présentent les résultats obtenus. La Figure 8.8 montre la variation de la température de la surface interne sur une période d'un an (8760 heures, figure de droite). La figure de gauche montre une vue détaillée de cette évolution pour une période plus courte s'étalant de  $t = 2100$  à  $t = 2900$  heures. La Figure 8.9 présente les résultats pour la surface externe et ce pour les mêmes intervalles de temps alors que la Figure 8.10 montre la variation des besoins pour les mêmes intervalles de temps. La période de la variation de la température extérieure est plus grande (90 jours, soit 2160 heures) pour ce deuxième cas pour bien atteindre l'état stable de la paroi après la transition.

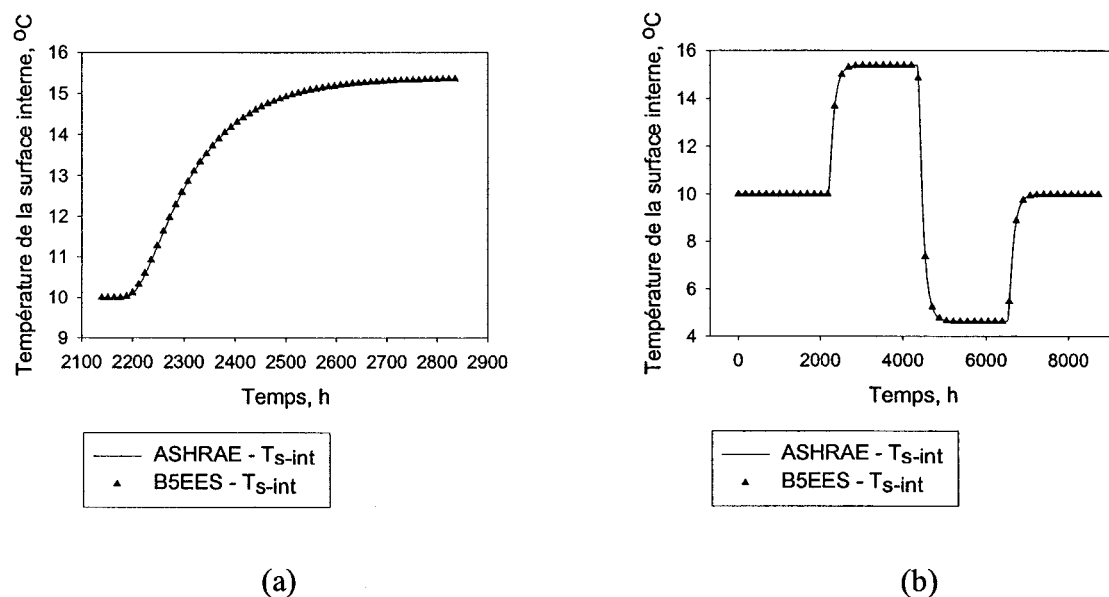
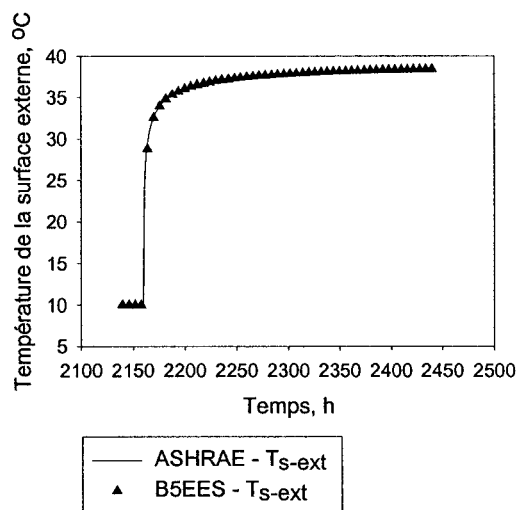
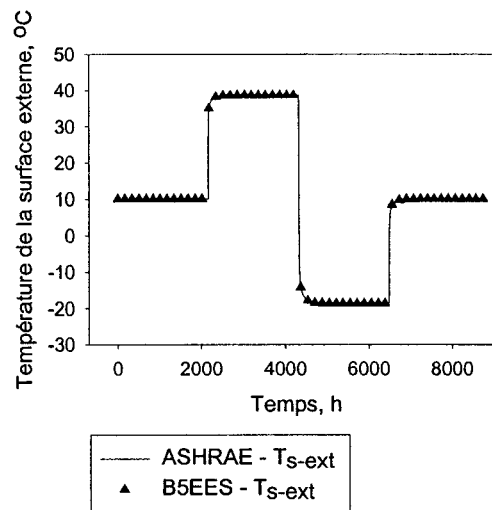


**Figure 8.8 :** Variation de la température de la surface interne d'une paroi lourde

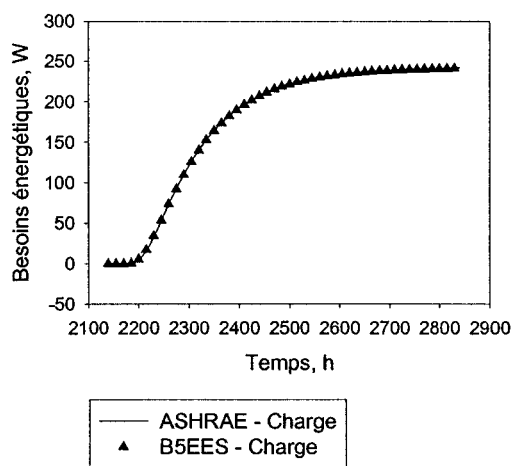


(a)

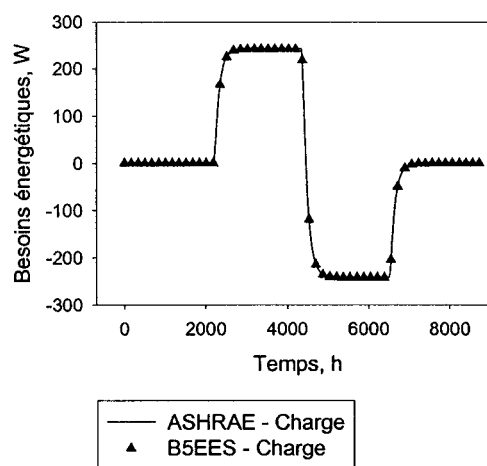


(b)

**Figure 8.9 :** Variation de la température de la surface externe d'une paroi lourde



(a)



(b)

**Figure 8.10 :** Variation des besoins de l'enceinte à paroi lourde

Les résultats de B5EES et de TC2 de ASHRAE (2002) concorde bien, avec une erreur infime (moins de 0,5%) associée au calcul des besoins. Une plus grande diffusivité de la paroi entraîne une évolution lente des températures dans la paroi. Ainsi, de plus grandes précisions sont obtenues même pour un pas de temps horaire.

### **8.2.3 Test 3 (TC3) : Conduction transitoire – paroi multicouche**

L'objectif de ce test est de trouver la réponse thermique d'une paroi d'une enceinte maintenue à température constante suite à un changement sinusoïdal de la température extérieure. Le modèle analytique de ce test est basé sur la solution de l'équation de conduction transitoire de Fourier pour une paroi multicouche soumise à des conditions de frontière convectives. La conduction est supposée unidimensionnelle. La température intérieure est fixée à la moyenne de la température extérieure. Finalement, l'enceinte est identique à celle du test 2.

Les graphiques suivants comparent les résultats de B5EES et ceux obtenus par le test TC3 de l'outil de validation analytique de ASHRAE (2002) pour les deux types de parois identifiés aux tableaux 8.1 et 8.2.

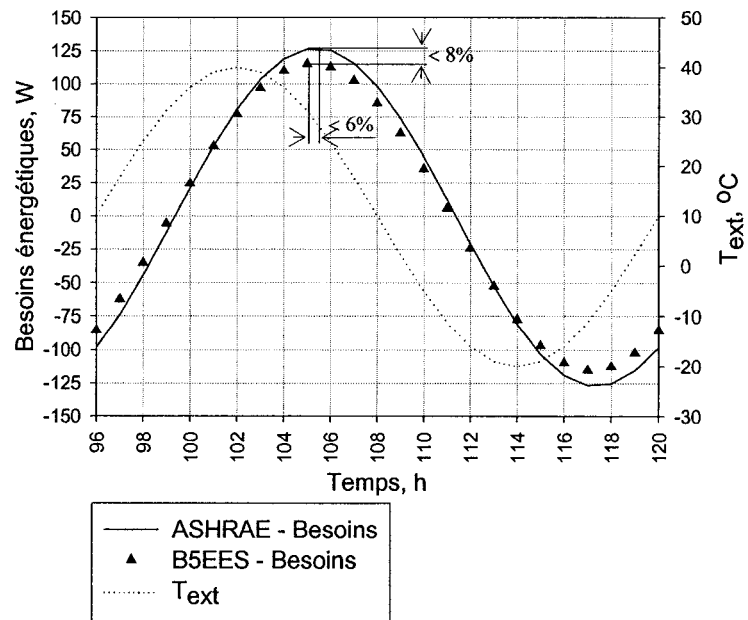


**Figure 8.11 :** Variation des besoins de l'enceinte à paroi légère

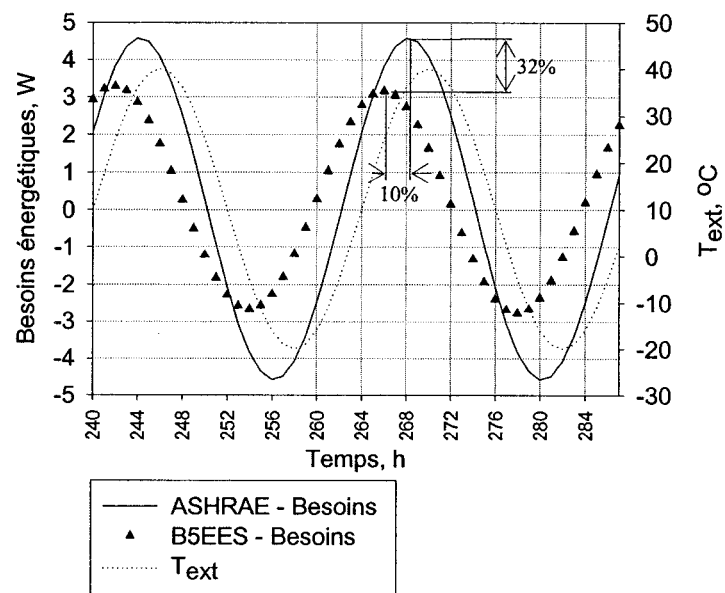


**Figure 8.12 :** Variation des besoins de l'enceinte à paroi lourde

Les résultats obtenus dans le cas de la paroi légère sont satisfaisants avec un écart de moins de 8% pour les besoins et de 6% pour le déphasage. Cependant, ceux de la paroi thermiquement lourde s'avèrent moins bons. En effet, les écarts sont de 32% au niveau des besoins et de 10% sur le déphasage.

Ces écarts sont essentiellement liés au maillage, au pas de temps utilisé, et au schéma temporel. L'influence du maillage et du schéma utilisés sont montrés à la Figure 8.13. Cette figure est issue des présents travaux mais pour des conditions différentes de celles du test 3 (Bernier et Randriamiarinjato, 2001). Elle montre l'évolution des besoins horaires en fonction du nombre de nœuds dans le mur et du type de schéma temporel employé (implicite ou Crank-Nicholson). Ces résultats sont comparés avec aux résultats obtenus avec la méthode TFM (ASHRAE, 1997). On remarque que l'augmentation du nombre de nœuds et l'emploi du schéma Crank-Nicholson améliore les résultats.

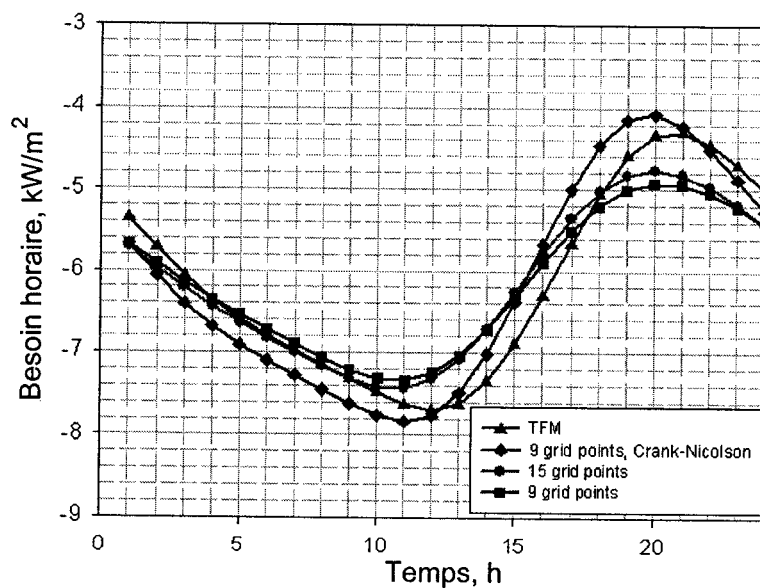


**Figure 8.13 :** Besoin horaire d'une zone en fonction du nombre de nœuds et du schéma temporel

Le graphique suivant montre l'évolution de la charge lorsque le pas de temps est réduit d'un facteur 10, soit 6 minutes pour les conditions du test 3.

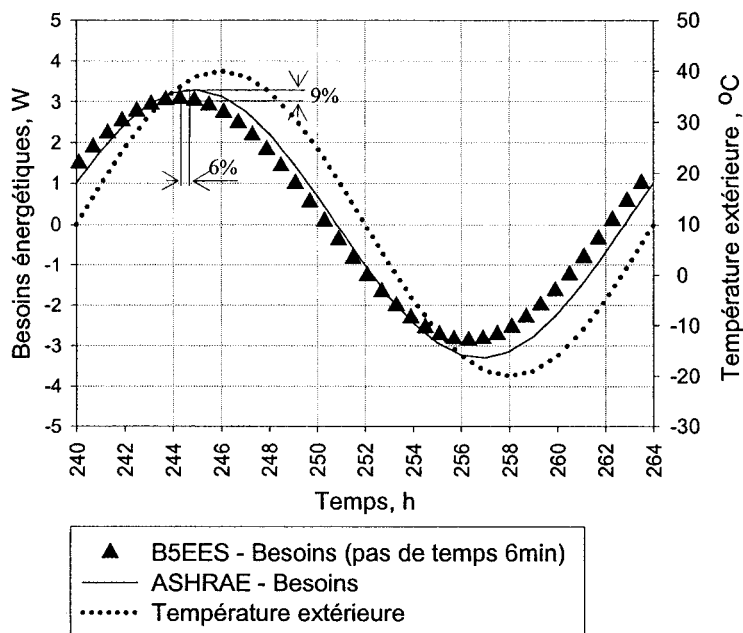


**Figure 8.14 :** Variation des besoins de l'enceinte à paroi lourde, pas de temps 6 minutes

Cette figure montre clairement que les résultats sont nettement meilleurs, Ainsi, par rapport aux résultats analytiques de ASHRAE, l'erreur sur les besoins n'est plus que 9%, et sur la déphasage elle est moins de 2%.

Il est bien entendu évident que le temps de simulation augmente avec la réduction du pas de temps (d'un facteur de 10 dans le cas de la figure 8.14). Il faut alors trouver le bon dosage entre la rapidité d'exécution du programme et la précision désirée. Cependant, la majorité des logiciels, dont B5EES, utilisent un pas de temps de 1 heure car la majorité des fichiers météo sont établies sur une base horaire.

#### 8.2.4 Test 4 (IntLWRad) : Échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde

L'objectif de ce test est de valider le traitement des échanges par rayonnement de grandes longueurs d'ondes entre les surfaces d'une zone. Pour ce test, une certaine quantité d'énergie est alimentée dans l'enceinte par l'intermédiaire d'une surface externe. Cette énergie est alors transmise par conduction vers l'intérieur grâce à la différence de température externe-interne.

La zone de test est cubique ( $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ ) et elle est illustrée à la figure 8.15. Aucune fenêtre n'est présente. Seule une surface du cuboïde est extérieure, alors que les autres surfaces sont adiabatiques.

Les températures extérieure et intérieure sont fixées respectivement égales à  $30^\circ\text{C}$  et  $10^\circ\text{C}$ . Le coefficient d'échange extérieur est égal à  $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  et le coefficient de convection interne est fixé à  $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Les surfaces internes ont une émissivité de 0,9. Les effets du rayonnement solaire, de l'infiltration, et des gains internes sont éliminés dans ce test.

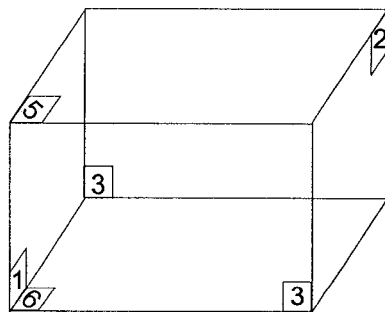


**Figure 8.15 :** Indices utilisés dans le test 4 ; la surface 1 est la paroi extérieure de la zone

Le Tableau 8.3 donne les résultats d'une comparaison entre l'outil ASHRAE et B5EES pour trois valeurs soit, la température de surface et les flux radiatifs et convectifs.

**Tableau 8.3 : Résultats de ASHRAE et de B5EES pour le test IntLWRad**

| Surface  | Température de surface intérieure, °C |           | Flux radiatif, W/m <sup>2</sup> |        | Flux convectif, W/m <sup>2</sup> |       |
|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------|--------|----------------------------------|-------|
|          | ASHRAE                                | B5EES     | ASHRAE                          | B5EES  | ASHRAE                           | B5EES |
| <b>1</b> | 20,49454                              | 20,494559 | 42,58209                        | 42,58  | 52,47269                         | 52,47 |
| <b>2</b> | 11,70267                              | 11,703301 | -8,51343                        | -8,516 | 8,513336                         | 8,517 |
| <b>3</b> | 11,70346                              | 11,703301 | -8,51726                        | -8,516 | 8,517303                         | 8,517 |
| <b>4</b> | 11,70346                              | 11,703301 | -8,51726                        | -8,516 | 8,517303                         | 8,517 |
| <b>5</b> | 11,70346                              | 11,703301 | -8,51727                        | -8,516 | 8,517303                         | 8,517 |
| <b>6</b> | 11,70346                              | 11,703301 | -8,51726                        | -8,516 | 8,517303                         | 8,517 |

La température des surfaces autre que la surface 1 résulte entièrement de l'échange radiatif de grandes longueurs d'onde entre les surfaces de l'enceinte. Les résultats du Tableau 8.3 montrent que B5EES évalue correctement les échanges par rayonnement.

### 8.2.5 Test 5 (IntHeatGain) : Gains internes

Ce test a pour but de valider la réponse thermique suite à un saut de gains internes convectif et radiatif dans une enceinte dont les murs sont adiabatiques. Les murs sont thermiquement massifs et la conduction thermique est évaluée en régime transitoire. L'air à l'intérieur de la zone est supposé sans masse thermique. Ainsi tous les gains convectifs provenant des gains internes sont ajoutés instantanément aux besoins de la zone. Les gains radiatifs sont traités comme des flux radiatifs constants distribués de façon égale sur toutes les surfaces de la pièce.

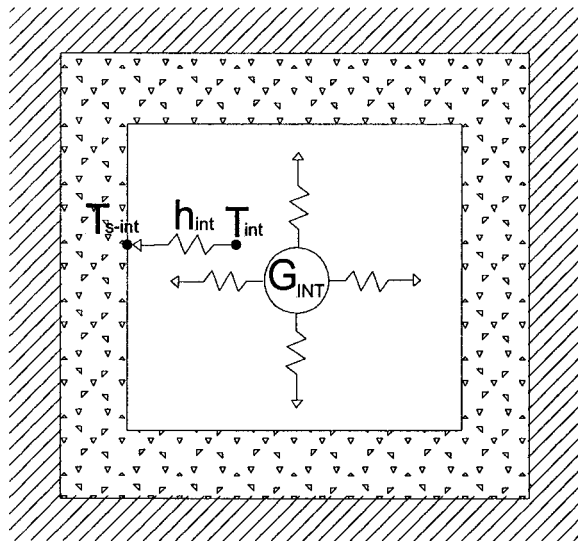


**Figure 8.16 :** Enceinte adiabatique pour le test des gains internes

La zone de test est cubique et a des dimensions internes  $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ . Aucune fenêtre n'est présente. L'enveloppe de la zone est constituée d'une couche unique homogène.

Ainsi, pour ce test, nous utiliserons comme enveloppe une paroi à simple couche de masse thermique suffisamment grande pour mettre en évidence l'allure de la conduction transitoire au travers la paroi. Ses propriétés thermophysiques sont les suivantes :

|                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| Épaisseur de la couche = | 0,1 m                  |
| Conductivité thermique = | 1 W/m.K                |
| Masse volumique =        | 1000 Kg/m <sup>3</sup> |
| Chaleur spécifique =     | 1000 J/kg.K            |

L'émissivité des surfaces n'a pas d'effet ici vu que les flux radiatifs sont déjà imposés. D'autre part, la température de l'air interne, ainsi que le coefficient de convection sont fixés.

Les autres paramètres utilisés sont :

|                                        |                       |
|----------------------------------------|-----------------------|
| Coefficient de convection interne =    | 5 W/m <sup>2</sup> .K |
| Température intérieure =               | 20 °C                 |
| Aire totale des surfaces =             | 54 m <sup>2</sup>     |
| Gains internes =                       | 3000 W                |
| Portion radiative des gains internes = | 50 %                  |

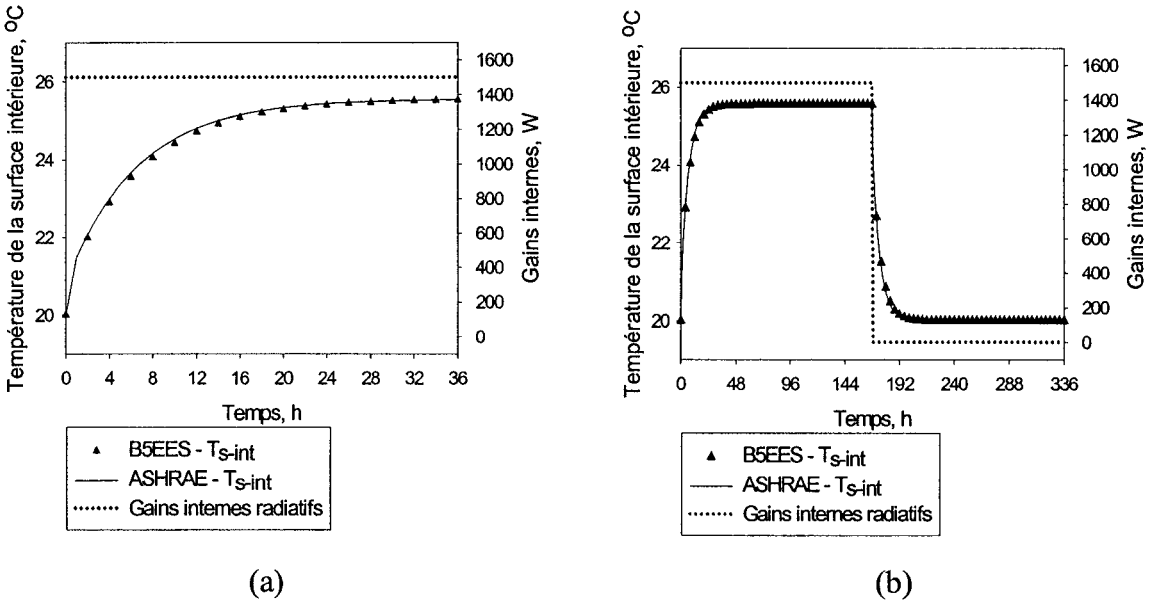


**Figure 8.17 :** Variation de la température de surface interne de l'enceinte pour un saut de gains internes

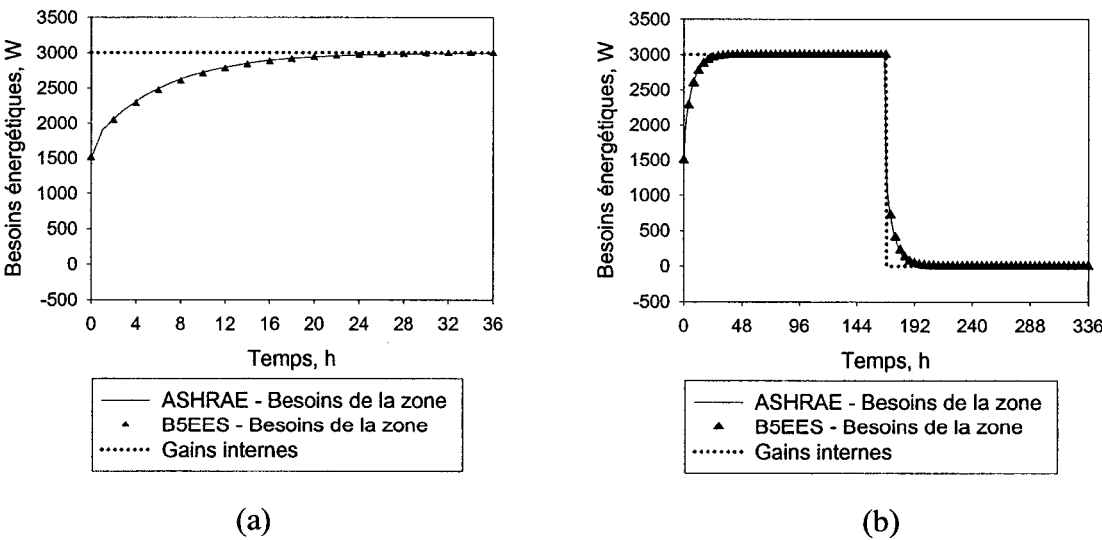


**Figure 8.18 :** Besoins en climatisation de la zone

Les figures 8.17 et 8.18 montrent les résultats obtenus. On remarque que les gains internes sont fixés à 3000 W à  $t = 0$  et ramenés à zéro à  $t = 168$  heures. La participation des gains internes convectifs aux besoins en climatisation est instantanée. On peut la vérifier à l'heure zéro des courbes de la figure 8.18 (a) où les besoins valent 1500 W, ce qui représente la portion convective des gains internes.

D'autre part, la portion radiative des gains internes est d'abord absorbée par les parois, puis relâchée sous forme de convection, avec un certain délai. Les résultats indiquent qu'à l'heure 36, presque 100% des gains internes deviennent un besoin dans la zone. Ceci indique que l'on a atteint un équilibre entre le flux radiatif absorbé et la convection aux parois.

A la deuxième phase du test (à partir de l'heure 168), nous pouvons voir la restitution de l'énergie stockée dans l'enveloppe quand les gains internes sont nuls. Comme l'enveloppe est adiabatique, l'énergie stockée dans le mur lors de la première phase devrait être entièrement libérée dans la zone quand les gains internes deviennent nuls. C'est effectivement ce qui se passe. Ainsi on remarque sur la figure 8.18 (b) que les besoins deviennent nuls après un certain temps.

### 8.3 Validations avec BESTEST

Cette section est consacrée à une validation dite « interlogicielle » et provient de l'approche BESTEST (*Building Energy Simulation Test*) développée par Judkoff et Neymark (1995). Ainsi, B5EES sera comparé avec des logiciels de simulation énergétique de bâtiment considérés comme les plus avancés tels que ESP, BLAST, DOE2, SRES/SUN, SERIRES, S3PAS, TRNSYS et TASE. Ces modèles de référence ne sont nécessairement représentatif de la « vérité », mais ce sont des logiciels communément acceptés comme maîtrisant l'art de la simulation énergétique des bâtiments en Europe et en Amérique.

#### 8.3.1 Paramètres de base de BESTEST

##### 8.3.1.1 Climat, bâtiment et site

Tous les cas de simulations BESTEST utilisent le même fichier météo. Fourni avec le format TMY, ce fichier a été transformé en format LKT pour pouvoir être lu par B5EES. Ce fichier météo correspond à un climat froid et clair en hiver et chaud et sec en été.

Le bâtiment test mesure 6 m × 8 m × 2,7 m et il est orienté selon les quatre points cardinaux (Figure 8.19) Il est situé à une latitude de 39,8° Nord, une longitude 104,9° Ouest. Finalement il est localisé à de 1609 m d'altitude.

Le coefficient de réflectivité du sol est de 0,2, alors que le site est plan et dépourvu de toute cache.

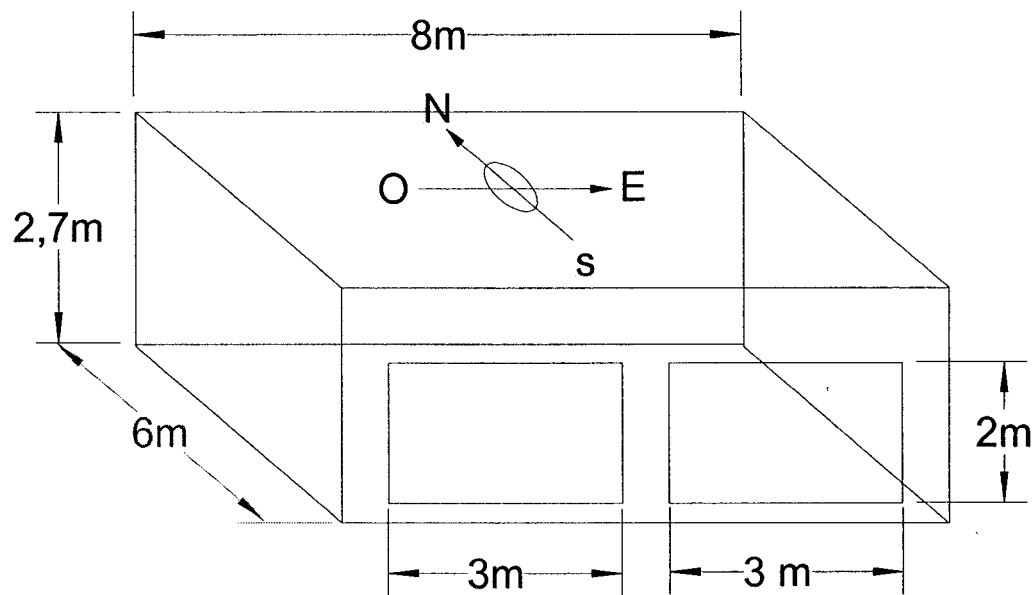


**Figure 8.19 :** Bâtiment de test, fenêtre au sud

### 8.3.1.2 Enveloppe du bâtiment

Les matériaux qui constituent les murs extérieurs, le toit et le plancher du bâtiment sont mentionnés au Tableau 8.4. Ils sont cités de la couche intérieure vers la couche la plus extérieure.

**Tableau 8.4 : Matériaux de l'enveloppe, cas de masse thermique légère**

| Élément          | Épaisseur,<br>m | Conductivité<br>thermique,<br>W/m.K | Masse<br>volumique,<br>kg/m <sup>3</sup> | Chaleur<br>massique,<br>J/kg.K |
|------------------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| Mur extérieur    |                 |                                     |                                          |                                |
| Plâtre           | 0,012           | 0,160                               | 950                                      | 840                            |
| Fibre de verre   | 0,066           | 0,040                               | 12                                       | 840                            |
| Bois             | 0,009           | 0,140                               | 530                                      | 900                            |
| Plancher         |                 |                                     |                                          |                                |
| Plancher de bois | 0,025           | 0,140                               | 650                                      | 1200                           |
| Isolation        | 1,003           | 0,040                               | 0                                        | 0                              |
| Toit             |                 |                                     |                                          |                                |
| Plâtre           | 0,010           | 0,160                               | 950                                      | 840                            |
| Fibre de verre   | 0,112           | 0,040                               | 12                                       | 840                            |
| Toiture          | 0,019           | 0,140                               | 530                                      | 900                            |

### 8.3.2 Validation des gains solaires

BESTEST permet également de valider les calculs relatifs aux gains solaires au niveau des murs extérieurs. Les figures 8.20 à 8.23 montrent les irradiances solaires incidents sur le mur sud et le mur ouest pour le 5 mars et le 27 juillet.

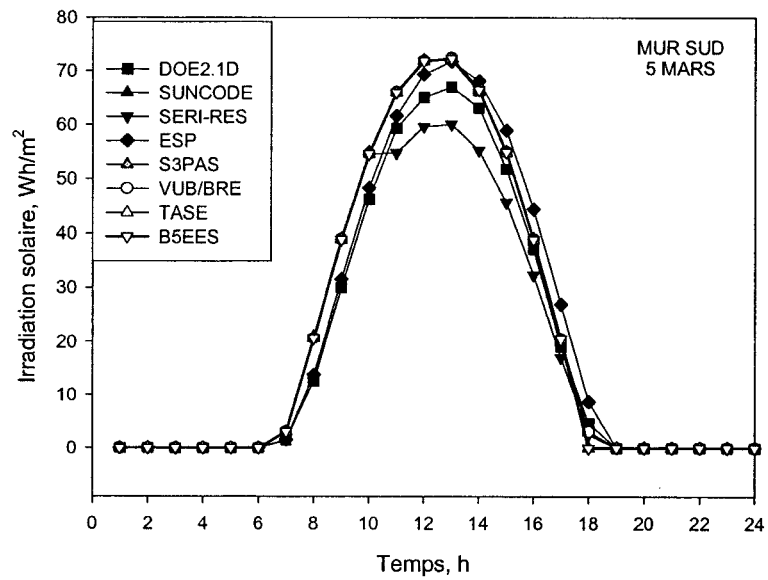


**Figure 8.20 :** Irradiation solaire sur le mur sud pour la journée du 5 mars

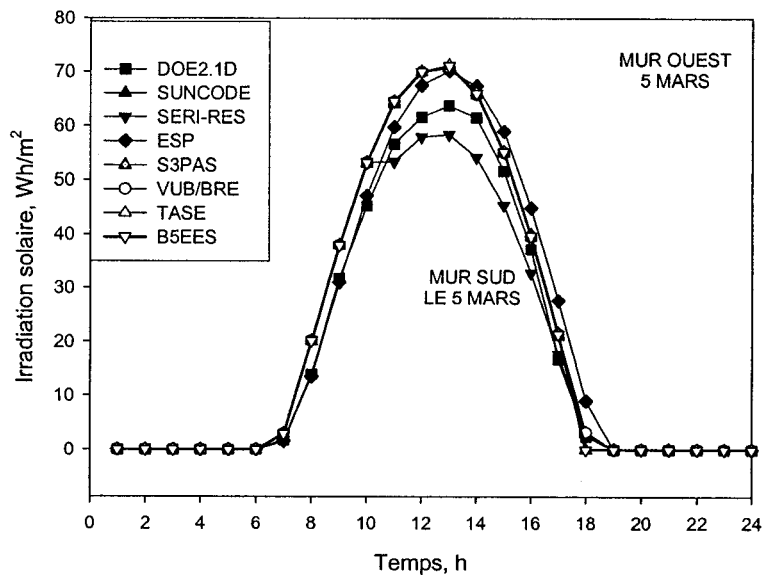


**Figure 8.21 :** Irradiation solaire sur le mur ouest pour la journée du 5 mars

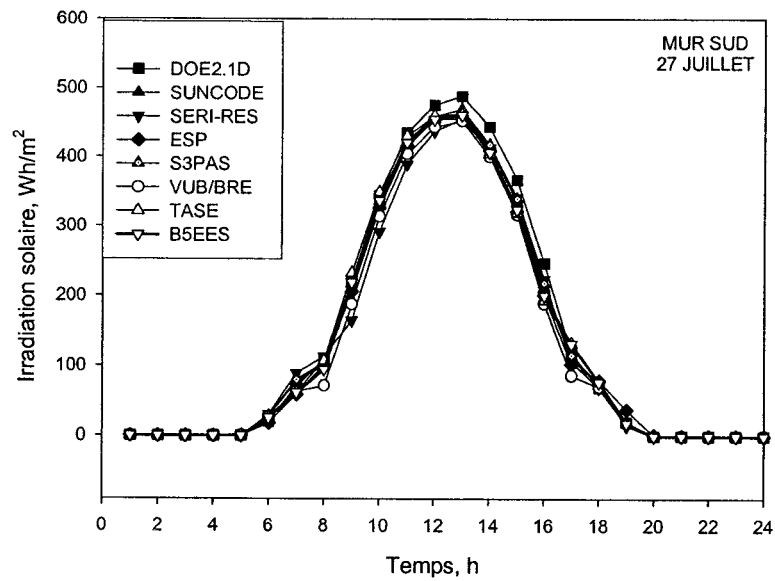


**Figure 8.22:** Irradiation solaire sur le mur sud pour la journée du 27 juillet

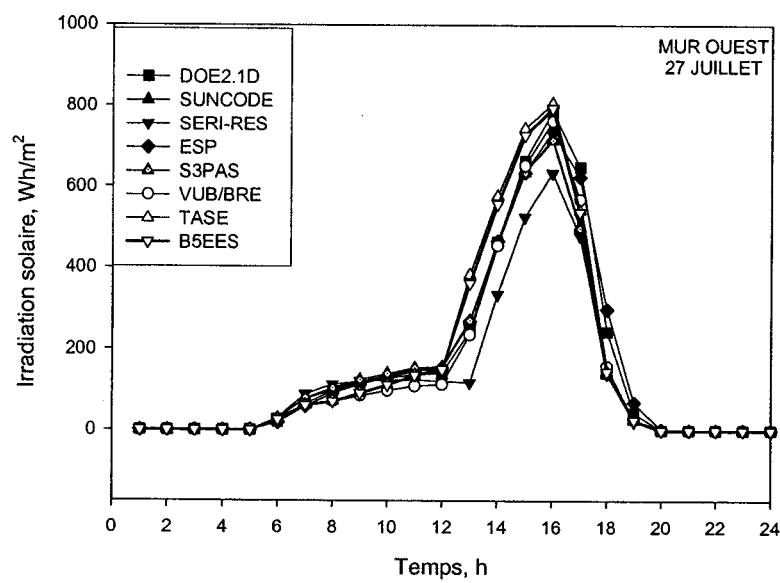


**Figure 8.23:** Irradiation solaire sur le mur ouest pour la journée du 27 juillet

**Tableau 8.5 :** Irradiations solaires sur les murs sud et ouest pour les journées du 5 mars et du 27 juillet à midi

|                                         | Irradiations solaires sur les murs à midi,<br>Wh/m <sup>2</sup> |       |            |        |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------|------------|--------|
|                                         | 5 MARS                                                          |       | 27 JUILLET |        |
|                                         | SUD                                                             | OUEST | SUD        | OUEST  |
| DOE2.1D                                 | 65,05                                                           | 61,58 | 475,37     | 141,34 |
| SUNCODE                                 | 71,78                                                           | 69,98 | 454,99     | 153,13 |
| SERI-RES                                | 59,65                                                           | 57,91 | 437,2      | 121,07 |
| ESP                                     | 69,3                                                            | 67,4  | 454,8      | 153,8  |
| S3PAS                                   | 72                                                              | 70    | 459        | 157    |
| VUB/BRE                                 | 71,92                                                           | 69,89 | 443,61     | 113,06 |
| TASE                                    | 71,74                                                           | 69,95 | 459,85     | 150,9  |
| Moyenne des références                  | 68,78                                                           | 66,67 | 454,97     | 141,47 |
| B5EES                                   | 71,79                                                           | 69,97 | 454,67     | 150,13 |
| Écart de B5EES par rapport à la moyenne | 4,4%                                                            | 4,9%  | -0,1%      | 6,1%   |

Ces résultats montrent que B5EES se compare favorablement aux autres logiciels pour ce qui est du calcul des irradiations solaires.

### 8.3.3 Études des cas

Après la validation des gains solaires, nous entamons l'étude des cas BESTEST. Nous procédons d'abord aux tests des cas élémentaires 195 et 270. Ces cas minimisent le nombre d'interactions entre les phénomènes thermiques qui peuvent porter confusion au diagnostic des problèmes. Ensuite, nous passerons aux cas de qualification 600FF et 900FF, des cas plus réels.

Les résultats à comparer lors des tests sont le besoin annuel de chauffage et le besoin annuel de climatisation. Pour se faire, comme B5EES détermine des besoins horaires d'une année complète, il suffit de faire la somme des besoins horaires négatifs

(chauffage) et des besoins horaires positifs (climatisation) pour obtenir les résultats requis.

#### 8.3.3.1 Cas 195

Le cas 195 teste la conduction au travers l'enveloppe du bâtiment. L'enveloppe (sans fenêtre), de masse thermique légère, est constituée entièrement des matériaux du Tableau 8.4. La température intérieure est fixée à 20°C pour toute l'année (lors du chauffage et de la climatisation). Les gains internes sont nuls. Les émissivités des surfaces intérieures et extérieures sont fixées à 0,1. L'absorptivité de courtes longueurs d'onde des surfaces extérieures est égale à 0,1.

#### 8.3.3.2 Cas 270

Le cas 270 teste les gains solaires au travers les fenêtres au Sud. En effet, deux fenêtres de surface totale de 12 m<sup>2</sup> se trouvent sur le mur au Sud (Figure 8.19). Elles ont un facteur de déperdition thermique  $U$  égal à 3 W/m<sup>2</sup>.K. Les fenêtres ne sont pas munies de cadres ou de rideau.

Comme ces fenêtres ne sont pas sur la liste des fenêtres standard proposées dans B5EES, nous devons introduire dans la fenêtre de saisie prévue par B5EES, en plus des surfaces des fenêtres et du pourcentage de l'aire du cadre, les valeurs de  $SHGC(\theta)$  et  $SHGC_d$  du Tableau 8.6.

**Tableau 8.6 :** Coefficients de gains solaires des fenêtres BESTEST en fonction de l'angle d'incidence

| Angle, en degré               | $SHGC(\theta)$ |
|-------------------------------|----------------|
| 0                             | 0,787          |
| 40                            | 0,767          |
| 50                            | 0,737          |
| 60                            | 0,666          |
| 70                            | 0,518          |
| 80                            | 0,266          |
| 90                            | 0,000          |
| Hémisphérique<br>( $SHGC_d$ ) | 0,686          |

Comme il n'y a pas de cadre, le pourcentage de l'aire du cadre,  $frame\%$ , est nul. Ainsi  $SHGC_{Op}$  n'a pas d'effet ici.

D'autre part, les émissivités intérieure et extérieure des surfaces sont fixées à 0,9. L'absorptivité de courtes longueurs d'onde des surfaces extérieures vaut 0,1. La température intérieure vaut toujours 20°C tout au long de l'année.

Les deux figures suivantes montrent les résultats comparatifs de B5EES avec les logiciels de référence pour les deux cas 195 et 270.

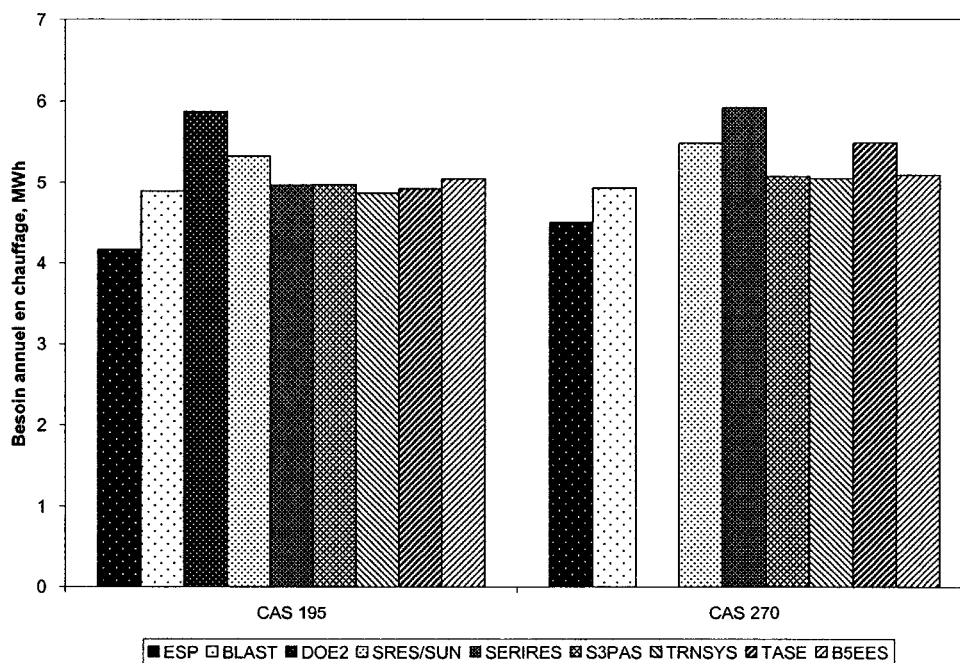


**Figure 8.24 :** Besoin annuel en chauffage pour les cas 195 et 270

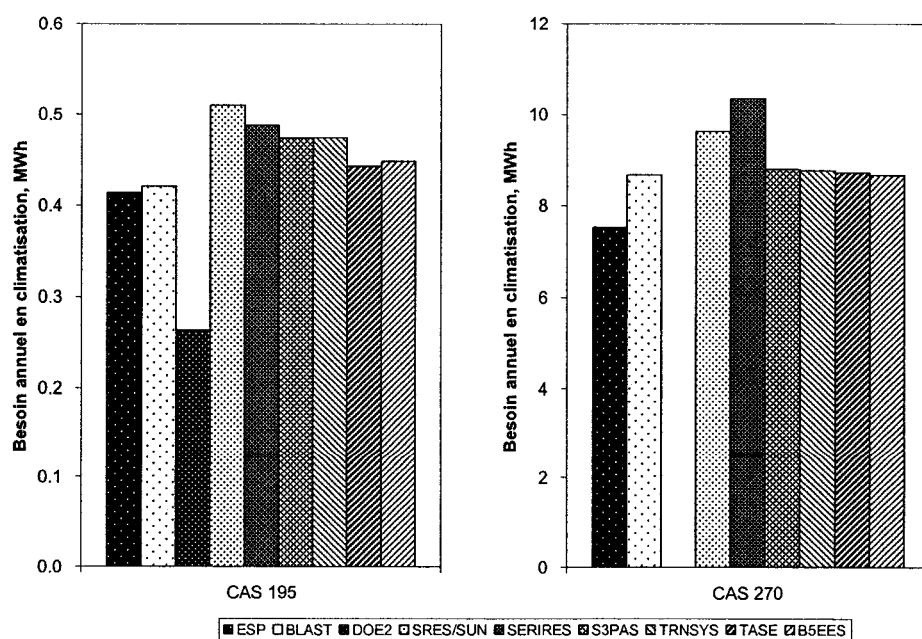


**Figure 8.25 :** Besoin annuel en climatisation pour les cas 195 et 270

**Tableau 8.7 : Besoins énergétiques annuels pour les cas 195 et 270**

|                                         | <b>Besoins énergétiques annuels,<br/>MWh</b> |                 |                      |                 |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
|                                         | <b>Chauffage</b>                             |                 | <b>Climatisation</b> |                 |
|                                         | <b>TEST 195</b>                              | <b>TEST 270</b> | <b>TEST 195</b>      | <b>TEST 270</b> |
| ESP                                     | 4,167                                        | 4,51            | 0,414                | 7,528           |
| BLAST                                   | 4,895                                        | 4,93            | 0,421                | 8,67            |
| DOE2                                    | 5,871                                        | -               | 0,264                | -               |
| SRES/SUN                                | 5,324                                        | 5,482           | 0,51                 | 9,631           |
| SERIRES                                 | 4,968                                        | 5,92            | 0,488                | 10,35           |
| S3PAS                                   | 4,973                                        | 5,072           | 0,474                | 8,795           |
| TRNSYS                                  | 4,871                                        | 5,047           | 0,4743               | 8,764           |
| TASE                                    | 4,921                                        | 5,489           | 0,443                | 8,714           |
| Moyenne des références                  | 4,999                                        | 5,207           | 0,436                | 8,922           |
| B5EES                                   | 5,045                                        | 5,091           | 0,448                | 8,663           |
| Écart de B5EES par rapport à la moyenne | <b>0,9%</b>                                  | <b>-2,2%</b>    | <b>2,8%</b>          | <b>-2,9%</b>    |

Les figures 8.24 et 8.25 montrent de bonnes estimations des besoins annuels en chauffage et en climatisation avec B5EES. En effet, les barres qui représentent B5EES se trouvent bien dans les plages des valeurs de référence. En fait, tel que montré au tableau 8.7, l'écart maximal entre B5EES et la moyenne des autres logiciels est de -2,9%.

### 8.3.3.3 Cas 600FF

Les séries 600 et 900 constituent pour BESTEST des cas de qualification. Cependant, plusieurs de ces tests font appel à une régulation de la température intérieure à l'aide d'un thermostat à « bande-morte ». Comme la version actuelle de B5EES ne permet pas de simuler un tel thermostat, seuls les cas où la température intérieure est laissée fluctuante sont examinés, notamment les cas 600FF et 900FF.

Pour le cas 600FF, le gain interne est de 200W et l'infiltration vaut 0,5 ACH (changement d'air à l'heure). Les émissivités intérieure et extérieure sont 0,9 alors que l'absorptivité de la surface extérieure vaut 0,6. Le test 600FF compare les températures annuelles maximale et minimale, et les températures moyennes annuelles. Il offre aussi des résultats horaires d'une journée entière (4 janvier) pour comparer l'évolution de la température intérieure. Enfin, l'enveloppe de la pièce est constituée par les matériaux du Tableau 8.4.

#### 8.3.3.4 Cas 900FF

Le cas 900FF reprend les conditions du cas 600FF sauf que les parois opaques de l'enveloppe du bâtiment sont thermiquement lourdes. Leurs propriétés thermophysiques sont montrées au Tableau 8.8.

**Tableau 8.8 : Matériaux de l'enveloppe, cas de masse thermique lourde**

| Élément        | Épaisseur, m | Conductivité thermique, W/m.K | Masse volumique, kg/m <sup>3</sup> | Chaleur massique, J/kg.K |
|----------------|--------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Mur extérieur  |              |                               |                                    |                          |
| Bloc de béton  | 0,100        | 0,510                         | 1400                               | 1000                     |
| Isolation      | 0,0615       | 0,040                         | 10                                 | 1400                     |
| Bois           | 0,009        | 0,140                         | 530                                | 900                      |
| Plancher       |              |                               |                                    |                          |
| Dalle de béton | 0,080        | 1,130                         | 1400                               | 1000                     |
| Isolation      | 1,007        | 0,040                         | 0                                  | 0                        |
| Toit           |              |                               |                                    |                          |
| Plâtre         | 0,010        | 0,160                         | 950                                | 840                      |
| Fibre de verre | 0,1118       | 0,040                         | 12                                 | 840                      |
| Toiture        | 0,019        | 0,140                         | 530                                | 900                      |

Note : Les matériaux sont cités de la couche intérieure vers la couche la plus extérieure.

Les résultats comparatifs sont montrés aux figures 8.26 à 8.30.

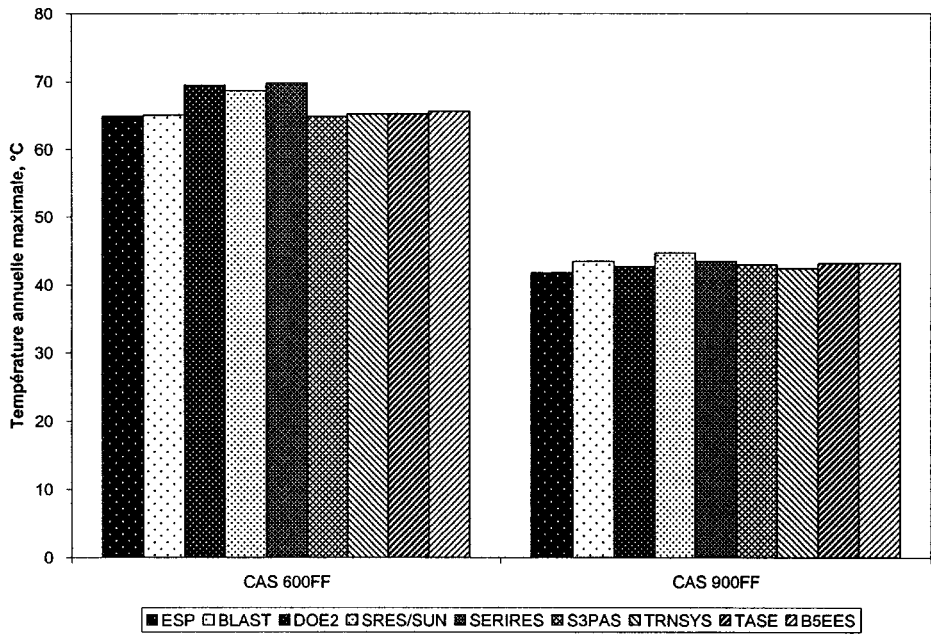


Figure 8.26 : Température annuelle maximale du cas 600FF et du cas 900FF

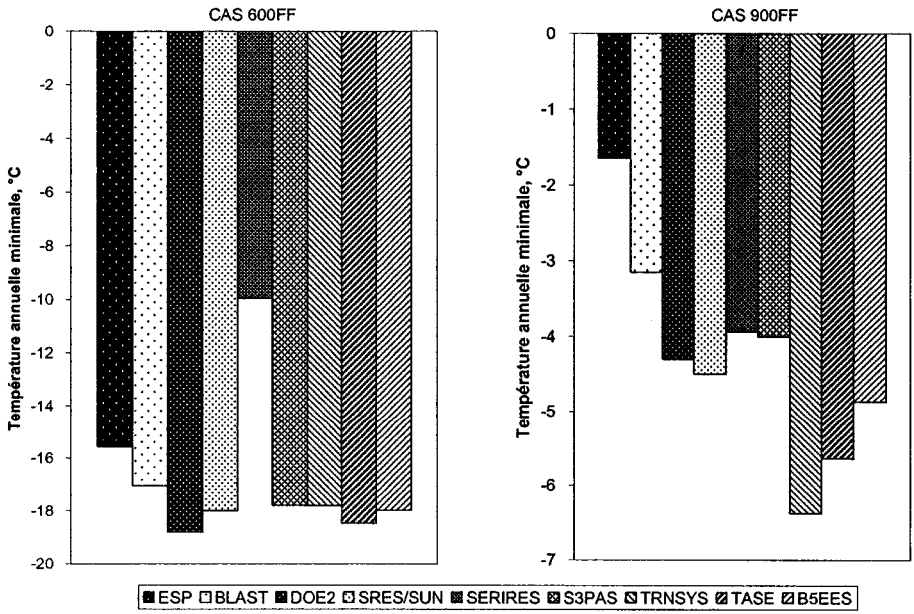


Figure 8.27 : Température annuelle minimale du cas 600FF et du cas 900FF

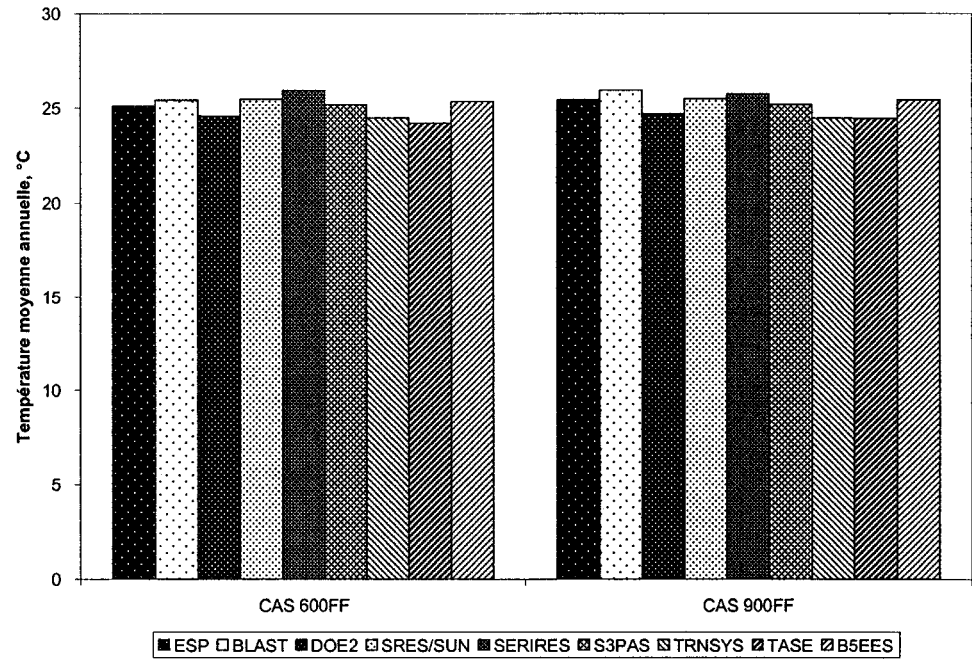


Figure 8.28 : Température moyenne annuelle du cas 600FF et du cas 900FF

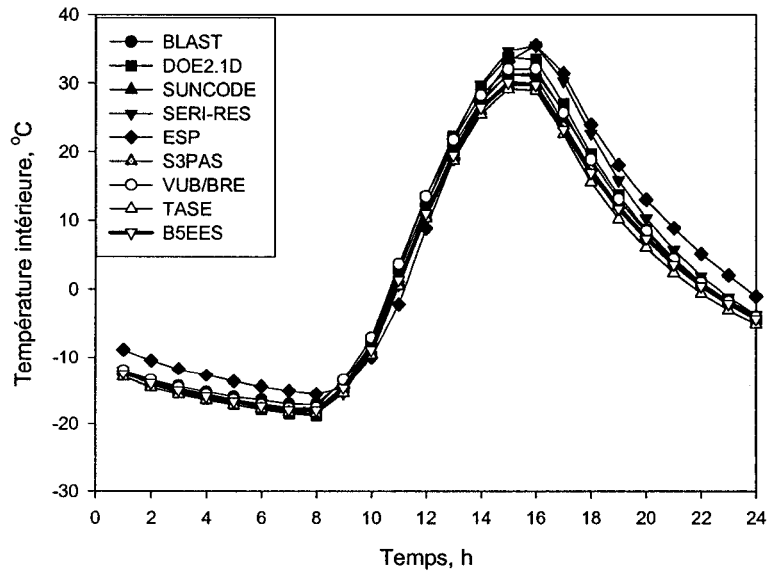


Figure 8.29 : Température intérieure du cas 600FF pour la journée du 4 janvier

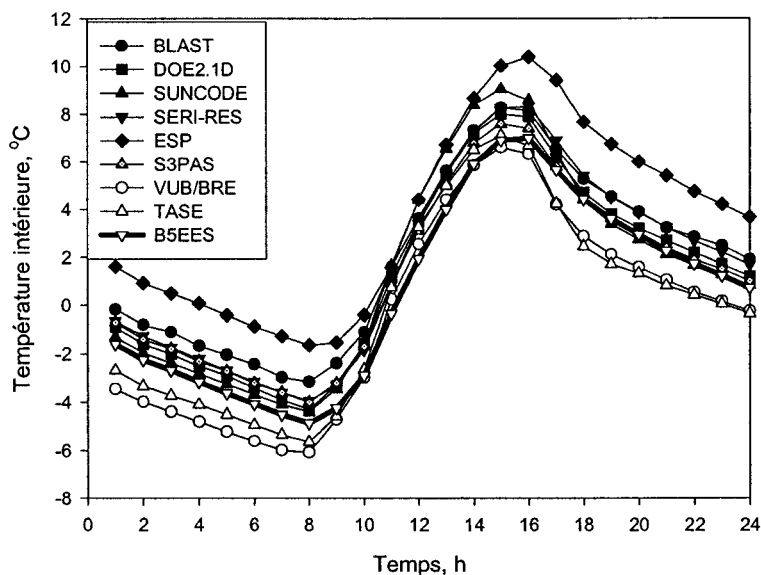


**Figure 8.30 :** Température intérieure du cas 900FF pour la journée du 4 janvier

**Tableau 8.9 :** Températures annuelles maximale, minimale et moyenne de la pièce pour les cas 600FF et 900FF

| CAS                                     | Température annuelle de la pièce (°C) |       |          |       |         |       |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|-------|----------|-------|---------|-------|
|                                         | Maximale                              |       | Minimale |       | Moyenne |       |
|                                         | 600FF                                 | 900FF | 600FF    | 900FF | 600FF   | 900FF |
| ESP                                     | 64,93                                 | 41,81 | -15,57   | -1,65 | 25,13   | 25,45 |
| BLAST                                   | 65,11                                 | 43,44 | -17,05   | -3,15 | 25,43   | 25,93 |
| DOE2                                    | 69,50                                 | 42,70 | -18,80   | -4,30 | 24,60   | 24,70 |
| SRES/SUN                                | 68,60                                 | 44,80 | -18,00   | -4,50 | 25,48   | 25,49 |
| SERIRES                                 | 69,81                                 | 43,44 | -9,96    | -3,94 | 25,93   | 25,72 |
| S3PAS                                   | 64,90                                 | 43,00 | -17,80   | -4,00 | 25,20   | 25,20 |
| TRNSYS                                  | 65,25                                 | 42,46 | -17,81   | -6,38 | 24,49   | 24,47 |
| TASE                                    | 65,25                                 | 43,17 | -18,47   | -5,64 | 24,22   | 24,45 |
| Moyenne des références                  | 66,67                                 | 43,10 | -16,68   | -4,19 | 25,06   | 25,18 |
| B5EES                                   | 65,60                                 | 43,20 | -17,99   | -4,87 | 25,34   | 25,43 |
| Écart de B5EES par rapport à la moyenne | -1,07                                 | 0,1   | -1,31    | -0,68 | 0,28    | 0,25  |

En se référant à la moyenne des résultats des logiciels de référence, le Tableau 8.9 montrent que l'erreur maximale commise par B5EES, pour les températures annuelles (maximale, minimale et moyenne) est de 1,3°C pour le cas 600FF et de 0,7°C pour le cas 900FF.

**Tableau 8.10 :** Température de la pièce pour la journée du 4 janvier pour les cas 600FF et 900FF

| Heures | Température de la journée du 4 janvier, °C |        |                                |                        |       |                                |
|--------|--------------------------------------------|--------|--------------------------------|------------------------|-------|--------------------------------|
|        | CAS 600FF                                  |        |                                | CAS 900FF              |       |                                |
|        | Moyenne des références                     | B5EES  | Écart de B5EES avec la moyenne | Moyenne des références | B5EES | Écart de B5EES avec la moyenne |
| 1      | -11,8                                      | -12,46 | -0,6                           | -1,0                   | -1,6  | -0,6                           |
| 2      | -13,4                                      | -13,98 | -0,6                           | -1,7                   | -2,3  | -0,6                           |
| 3      | -14,5                                      | -15,02 | -0,5                           | -2,1                   | -2,7  | -0,6                           |
| 4      | -15,5                                      | -15,92 | -0,5                           | -2,5                   | -3,2  | -0,6                           |
| 5      | -16,3                                      | -16,70 | -0,4                           | -3,0                   | -3,6  | -0,7                           |
| 6      | -16,9                                      | -17,36 | -0,5                           | -3,4                   | -4,1  | -0,7                           |
| 7      | -17,5                                      | -17,93 | -0,4                           | -3,8                   | -4,5  | -0,7                           |
| 8      | -17,7                                      | -17,99 | -0,3                           | -4,1                   | -4,9  | -0,7                           |
| 9      | -14,6                                      | -14,66 | 0,0                            | -3,3                   | -4,2  | -0,9                           |
| 10     | -8,8                                       | -8,83  | -0,1                           | -1,7                   | -2,9  | -1,2                           |
| 11     | 1,3                                        | 1,39   | 0,1                            | 1,1                    | -0,3  | -1,4                           |
| 12     | 11,5                                       | 11,03  | -0,5                           | 3,5                    | 1,9   | -1,6                           |
| 13     | 20,5                                       | 19,52  | -0,9                           | 5,5                    | 4,0   | -1,6                           |
| 14     | 27,6                                       | 26,5   | -1,1                           | 7,3                    | 5,9   | -1,3                           |
| 15     | 31,9                                       | 30,12  | -1,8                           | 8,1                    | 6,9   | -1,2                           |
| 16     | 32,2                                       | 29,77  | -2,5                           | 8,0                    | 7,0   | -1,0                           |
| 17     | 26,4                                       | 23,26  | -3,1                           | 6,2                    | 5,6   | -0,6                           |
| 18     | 19,4                                       | 16,96  | -2,4                           | 4,6                    | 4,4   | -0,2                           |
| 19     | 13,5                                       | 11,70  | -1,8                           | 3,8                    | 3,6   | -0,2                           |
| 20     | 8,8                                        | 7,37   | -1,4                           | 3,2                    | 2,9   | -0,3                           |
| 21     | 4,7                                        | 3,55   | -1,2                           | 2,6                    | 2,3   | -0,4                           |
| 22     | 1,4                                        | 0,45   | -0,9                           | 2,1                    | 1,7   | -0,4                           |
| 23     | -1,4                                       | -2,11  | -0,7                           | 1,7                    | 1,2   | -0,5                           |
| 24     | -3,8                                       | -4,23  | -0,5                           | 1,2                    | 0,7   | -0,5                           |

Les figures 8.29 et 8.30 montrent la position températures internes déterminées par B5EES dans la plage des résultats de référence. Cette dernière est quantifiée, dans le Tableau 8.10, par l'écart des températures issues de B5EES par rapport aux moyennes des références. Cet écart est au maximum 3,1°C pour le cas 600FF et moins de 1,6°C pour le cas 900FF.

Bref, les résultats issus de B5EES pour les cas 600FF et 900FF se comparent très favorablement aux résultats des autres logiciels.

#### **8.3.4 Conclusion**

Nous pouvons conclure que, après les deux tests des cas élémentaires 195 et 270 et les cas de qualification 600FF et 900FF, B5EES fournit des résultats fiables qu'on peut exploiter pour des études d'avant-projets.

## **CHAPITRE 9**

### **ORGANISATION GÉNÉRALE DU LOGICIEL BSEES ET EXEMPLE D'UTILISATION**

#### **9.1 Organisation générale des modules du programme**

BSEES possède 7 modules indépendants pour effectuer une simulation énergétique de bâtiment. Tel que montré à la figure 9.1, ces modules font appel à des fichiers d'entrées et fournissent en aval des fichiers de sorties, accessibles aux autres modules.

BSEES a été réalisé avec la version professionnelle de EES (version 6.577 pro.).

##### **9.1.1 Module "Conversion en cinq zones"**

Ce module permet de convertir un bâtiment donné en cinq zones. L'utilisateur doit renseigner le logiciel sur la hauteur du niveau, la longueur et l'orientation des murs extérieurs ainsi que les aires des surfaces périphériques. Cinq vecteurs géométriques ressortent en aval et sont stockés dans le fichier "step2.csv". Ces vecteurs se nomment : Haut, L[1..12], S[1..12], Vol[1..5], Aire[1..5], Angle[1..4].

##### **9.1.2 Module "Surfaces opaques"**

Ce module relatif au traitement des surfaces opaques (mur, toit, plancher et cloison) comprend trois sous-modules.

### 9.1.2.1 Sous-module "Couches"

C'est ici que l'utilisateur choisit les couches constituant les parois opaques. Les résultats du module sont stockés dans les fichiers "mur.csv", "toit.csv", "plancher.csv" et "cloisons.csv". Pour chacune des parois les paramètres suivants sont considérés : épaisseur[1..5],  $\lambda$ [1..5],  $\rho$ [1..5] et  $C_p$ [1..5].

### 9.1.2.2 Sous-module "Maillage"

Ce module construit le maillage du mur pour que chacune des couches comprenne 3 nœuds. Un mur constitué de cinq couches aura, par conséquent, 15 nœuds. Les fichiers de sorties de ce module sont "wallprop.csv", "floorprop.csv", "ceilingprop.csv" et "partitionprop.csv". Ces fichiers contiennent les différentes dimensions et positions des volumes de contrôle contenant les nœuds :  $X$ [1..15],  $\Delta x$ [1..15],  $Dx$ [1..15]

### 9.1.2.3 Sous-module "Nœuds"

Ce module affecte à chacun des nœuds ses propriétés thermophysiques ( $\lambda$  [1..15],  $\rho$ [1..15],  $C_p$ [1..15],  $\gamma$ [1..15]) dans les fichiers "wall\_gpphysprop.csv", "floor\_gpphysprop.csv", "ceil\_gpphysprop.csv" et "partit\_gpphysprop.csv".

## 9.1.3 Module "Gains solaires"

C'est ici que le lieu de la simulation est choisi. Le programme charge ainsi le fichier météo de la ville considéré (NomVille.LKT). Cette première version de B5EES comporte deux fichiers météo : montreal.LKT (le fichier météorologique canadien pour l'énergie et le génie de la ville de Montréal) et codenvert.LKT (le fichier météo utilisé

par BESTEST). Pour d'autre ville, les fichiers météo LKT doivent respecter le format présenté à l'annexe C pour être sélectionné après le choix de l'option « autre » dans le menu tombant de la localité.

Ce module détermine les gains solaires instantanés sur les surfaces extérieures. Les gains solaires sont calculés avec les données horaires du fichier météo de la localité choisie. Les résultats, contenues dans  $G_t[1..6]$ , sont stockés dans le fichier "gainsmursext.txt".

#### **9.1.4 Module "Surfaces transparentes"**

Ce module traite le cas des fenêtres. Les gains solaires au travers des fenêtres,  $Q_{TOT,win}[1..4]$ , calculés dans ce module sont mis dans le fichier "gainsfenetres.txt". Les surfaces des fenêtres  $S_{win}[1..4]$  ainsi que leurs facteurs de déperdition thermiques  $U_{win}[1..4]$  sont stockés dans le fichier "facteur\_U.csv".

#### **9.1.5 Module "Échanges GLO"**

Ce module calcule les différents facteurs de forme nécessaire aux calculs des échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde. Les facteurs de forme  $F[1..4,1..7,1..7]$  et  $F[5,1..6,1..6]$  sont stockés dans le fichier "datapprox.csv".

#### **9.1.6 Module "Gains internes"**

Ce dernier quantifie les gains internes générés dans chacune des zones. Les résultats,  $G_{int,rad}[1..5]$  et  $G_{int,con}[1..5]$ , sont stockés dans le fichier "gainsinternes.csv".

### 9.1.7 Module "Transfert thermique transitoire"

Les différents paramètres issus des modules précédents convergent vers ce module. Ce dernier détermine les besoins énergétiques de chacune des zones en tenant compte du transfert thermique transitoire au travers les surfaces opaques, des gains solaires au travers les surfaces vitrés, des gains internes et des échanges de grandes longueurs d'onde. Les résultats,  $Besoin[1..5]$ ,  $T_{int}[1..5]$ ,  $T_{s,ext}[1..5,1..6]$  et  $T_{s,int}[1..5,1..6]$  sont stockés dans le fichier "resultats.txt".

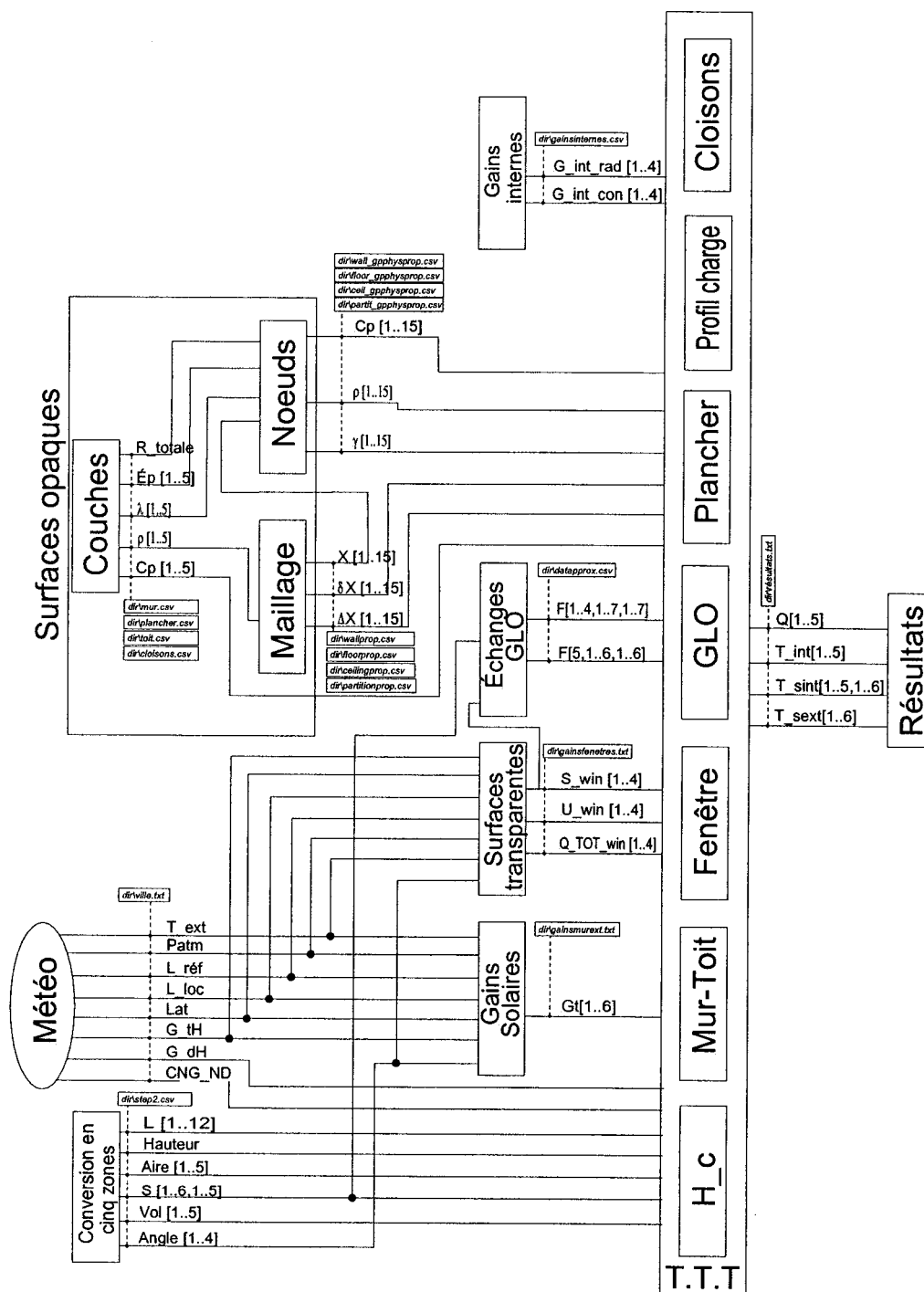


Figure 9.1 : Organisation modulaire du programme B5EES

## 9.2 Exemple d'utilisation de B5EES

Cette section est consacrée à un exemple d'utilisation étapes par étapes de B5EES.

Le bâtiment utilisé pour cette démonstration est montré à la Figure 9.2 (Lemire, 1999). Il comporte 4 zones périphériques identiques de  $325 \text{ m}^2$  et une zone centrale carrée de  $3600 \text{ m}^2$  réparties sur un seul étage de 3,33 m de haut.

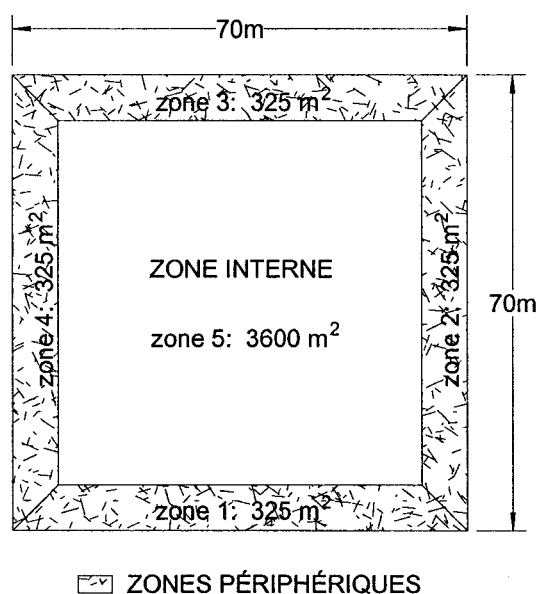


**Figure 9.2 : Bâtiment étudié**

Les murs externes sont constitués de matériaux correspondant à la paroi numéro 10 de ASHRAE (E1-C2-B5-A2, i.e panneau de gypse 20mm – bloc de béton faible densité 100mm – isolation 25mm – Brique de façade 100mm). Le toit et le plancher sont identiques et comportent les couches E5-C13-B20-E3-E2 (tuile acoustique – béton haute densité 150mm – Isolation 20mm – feutre et membrane 10mm – scories ou gravier 12mm). La cloison est composée d'une rangée de béton (couche C8 de ASHRAE, bloc de béton haute densité 200mm).

Le bâtiment à simuler, entouré de sol couvert de pelouse, se trouve à Montréal. Chacun des murs extérieurs comporte  $70\text{m}^2$  de fenêtres **7a** (double vitrage – 12,7 mm Argon – Claire-Claire. Voir Tableau 5.1). Il n’y a pas de rideau.

Les températures intérieures des zones sont fixées à  $22^\circ\text{C}$ . Le bâtiment est occupé de 7 heures à 21 heures. En dehors de la période d’occupation, les gains internes sont nuls alors qu’en fin de semaine ils sont réduits à 20% du maximum. La zone sous le plancher est conditionnée sous une température de  $22^\circ\text{C}$ .

Les données relatives aux gains internes sont données au tableau 9.1.

**Tableau 9.1 : Données relatives aux gains internes**

|            |                             |
|------------|-----------------------------|
| Occupation | 0,07 Occupant/ $\text{m}^2$ |
|            | 130 W/occupant              |
| Éclairage  | 20 $\text{W}/\text{m}^2$    |
| Équipement | 8,9 $\text{W}/\text{m}^2$   |

### 9.2.1 Menu principal

La fenêtre d’ouverture de B5EES est montrée à la Figure 9.3

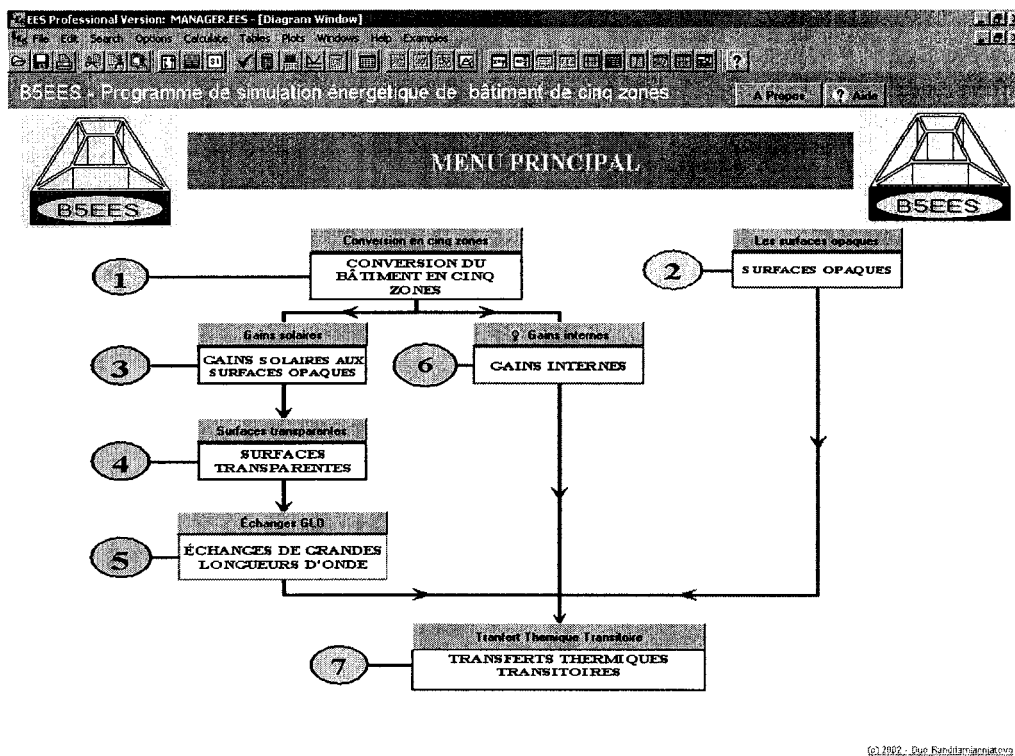


**Figure 9.3 : Menu principal de B5EES**

Tel que montré à la Figure 9.1, il y a 7 étapes à réaliser pour simuler un bâtiment avec B5EES. Le logiciel est conçu de telle sorte qu'à la fin de chaque étape, l'utilisateur est ramené au menu principal.

### 9.2.2 Étape 1 : Conversion du bâtiment en cinq zones

L'étape 1 se déroule en deux tranches. La Figure 9.4 montre la première tranche correspondant à la saisie du bâtiment de la Figure 9.2 dans B5EES.

B5EES Professional Version: PLAN-ETAPE1.EES - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Étape 1

**CONVERSION DU BÂTIMENT EN CINQ ZONES**

| 1ère tranche                 |         |         |          |           |
|------------------------------|---------|---------|----------|-----------|
|                              | mur Sud | mur Est | mur Nord | mur Ouest |
| Longueur [m]                 | 70      | 70      | 70       | -         |
| Angle [°]                    | 0       | 90      | 0        | -         |
| Surface péri. [m²]           | 325     | 525     | 325      | 325       |
| Hauteur du niveau = 3.33 [m] |         |         |          |           |

1 - Remplir toutes les cases de saisie ou charger un bâtiment déjà traité ici

2 - Valider les données >>

3 - Vous pouvez enregistrer ce bâtiment pour une utilisation ultérieure en cliquant ici

4 - Continuer à la deuxième tranche >>

**Figure 9.4 :** Saisie des données pour la conversion du bâtiment en cinq zones.

Au cours des étapes, les boutons « load » et « save » sont présents quand l'utilisateur est demandé de saisir ou de sélectionner des choix. Le bouton « save » permet de sauvegarder les saisies effectuées dans un fichier d'extension VAR. Le bouton « load » permet de charger dans les cases de saisie les valeurs des paramètres sauvegardés avec « load ». Dans chaque étape, il est recommandé d'identifier convenablement le fichier correspondant à chaque sauvegarde afin d'éviter toute confusion et erreur lors de son chargement aux utilisations ultérieures. Dans B5EES, un fichier de saisie peut seulement être chargé dans l'étape où il a été sauvegardé même s'il porte l'extension VAR.

La deuxième tranche de l'étape 1 (Figure 9.5) finalise la conversion du bâtiment en cinq zones.

EEFS Professional Version: PLAN-ETAPE2.EFS - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plot Windows Help Examples

CONVERSION DU BÂTIMENT EN CINQ ZONES

Étape 1

| 2ème tranche       |         |         |          |           |
|--------------------|---------|---------|----------|-----------|
|                    | mur Sud | mur Est | mur Nord | mur Ouest |
| Longueur [m]       | 70      | 70      | 70       | 70        |
| Angle [°]          | 0       | 90      | 0        | 90        |
| Surface péri. [m²] | 325     | 325     | 325      | 325       |

Surface totale = 4900 [m²]  
 Surface intérieure = 3600 [m²]  
 Surface périphérique totale = 1300 [m²]

1 - Cliquer ici pour finaliser la conversion du bâtiment   
 2 - Voir le plan définitif issu de la conversion du bâtiment   
 3 - Vous pouvez revenir à la 1ère tranche pour corriger   
 4 - Sinon, passer au menu principal pour continuer à l'étape suivante

**Figure 9.5 :** Finalisation de conversion du bâtiment en cinq zones

La Figure 9.6 apparaît en appuyant sur le bouton « Voir plan du bâtiment » de la Figure 9.5.

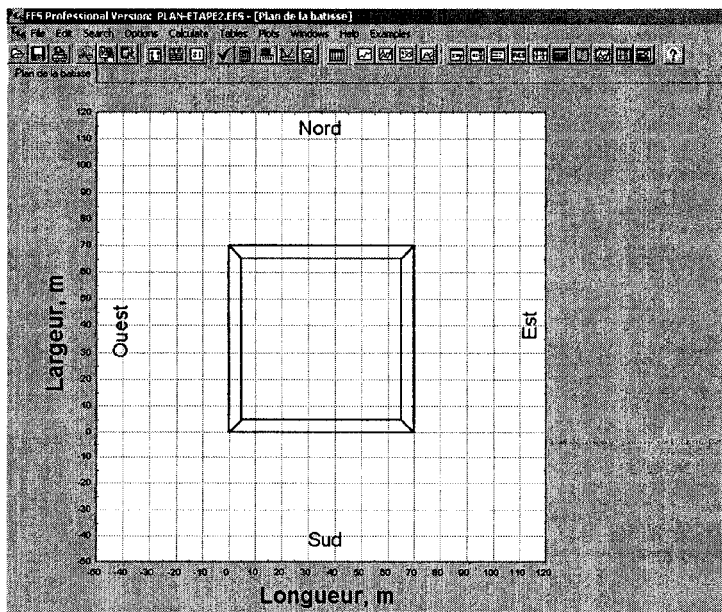


**Figure 9.6 :** Plan issu de la conversion de bâtiment

### 9.2.3 Étape 2 : Saisie et traitements des parois opaques

Le bouton « Les surfaces opaques » du menu principal nous ramène à la première tranche de l'étape 2 correspondant aux saisies des parois opaques (Figure 9.7).

EES Professional Version: PAROIS OPAQUES.EES - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

LES SURFACES OPAQUES ? Aide

Étape 2 1ère tranche : Composition des parois

1 - Sélectionner la paroi à composer TOIT

2 - Composer la paroi ou chargée une paroi existante ici Load

| NOUVELLE PAROI             |                            |                           |                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Couche 1                   | Couche 2                   | Couche 3                  | Couche 4                   | Couche 5                   |
| E2                         | E3                         | B20                       | C13                        | E5                         |
| 12 [mm]                    | 10 [mm]                    | 20 [mm]                   | 150 [mm]                   | 10 [mm]                    |
| 1.438 [W/m K]              | 0.10 [W/m K]               | 0.043 [W/m K]             | 1.731 [W/m K]              | 0.081 [W/m K]              |
| 881 [kgm <sup>-3</sup> ]   | 1121 [kgm <sup>-3</sup> ]  | 91 [kgm <sup>-3</sup> ]   | 2243 [kgm <sup>-3</sup> ]  | 401 [kgm <sup>-3</sup> ]   |
| 1.87 [J/kg K]              | 1.87 [J/kg K]              | 0.84 [J/kg K]             | 0.84 [J/kg K]              | 0.84 [J/kg K]              |
| 0.009 [m <sup>2</sup> K/W] | 0.05 [m <sup>2</sup> K/W]  | 0.44 [m <sup>2</sup> K/W] | 0.088 [m <sup>2</sup> K/W] | 0.314 [m <sup>2</sup> K/W] |
| 11.22 [kg/m <sup>2</sup> ] | 10.74 [kg/m <sup>2</sup> ] | 1.82 [kg/m <sup>2</sup> ] | 341.9 [kg/m <sup>2</sup> ] | 9.22 [kg/m <sup>2</sup> ]  |
| 12                         | 10                         | 20                        | 150                        | 19                         |

EXTÉRIEUR

INTÉRIEUR

1. 12 MM SLAB OR STONE  
2. 10 MM FELT AND MEMBRANE  
3. 20 MM INSULATION  
4. 150 MM HIGH DENSITY CONCRETE  
5. ACOUSTIC TILE

R<sub>TOTAL</sub>=0.901 [m<sup>2</sup> K/W]  
U=1.11 [W/m<sup>2</sup> K]

3 - Valider cette paroi Valider LES TOITS sont validé(e)s quand je vire au rouge

4 - Enregistrer cette paroi pour une utilisation ultérieure Save

5 - Revenir à 1 pour composer les autres parois

6 - Quand les quatre parois sont terminées, continuer ici MAILLAGE >>

Copyright 2002 - Dns Randnammarinjao

**Figure 9.7 :** Saisie des parois opaques

Quand les quatre types de parois (murs extérieurs, toit, plancher et cloisons) sont composés, nous passons à la deuxième tranche de l'étape 2, le maillage des parois opaques. L'appui sur le bouton de la section numéro 6 de la Figure 9.7 ouvre le sous-module « maillage » dont l'interface graphique est montrée à la Figure 9.8.

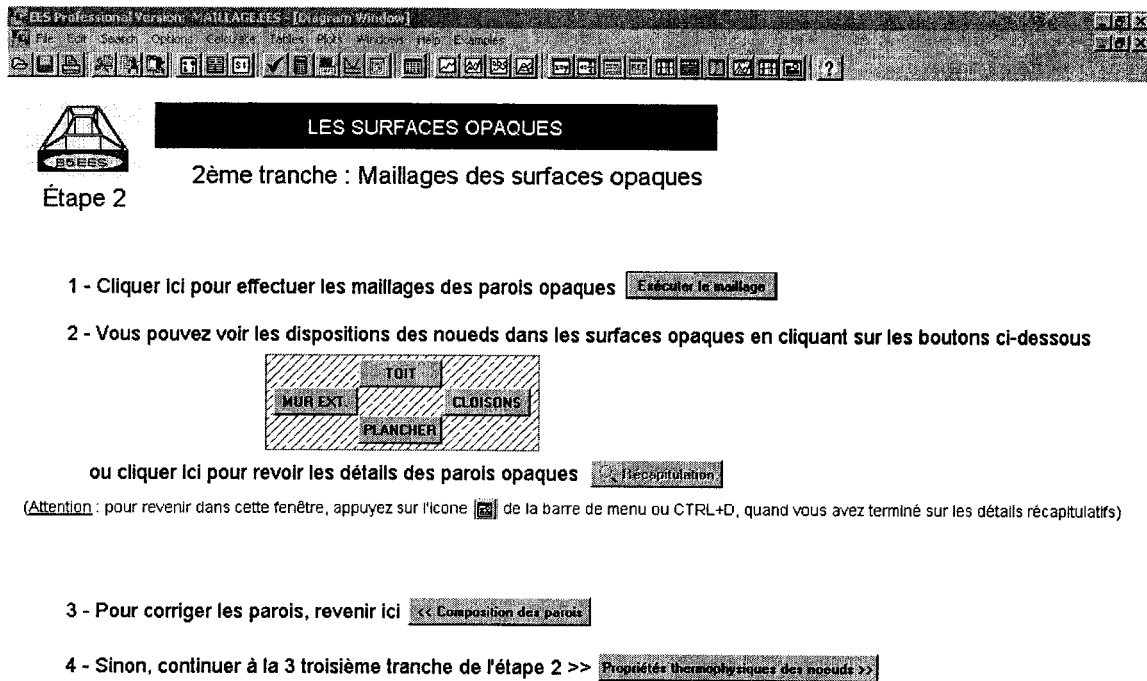


**Figure 9.8 : Maillage des parois opaques**

Après avoir exécuté le sous-module maillage, nous pouvons observer les positions des nœuds dans les parois opaques (Figure 9.9).

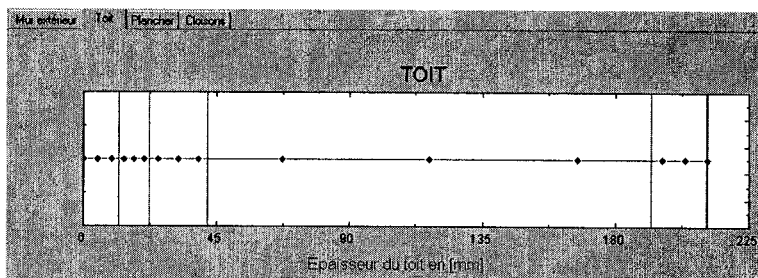


**Figure 9.9 : Positions des nœuds dans le toit composé de E5-C13-B20-E3-E2**

La troisième et dernière tranche de l'étape 2 consiste à affecter aux nœuds, ainsi placés lors de la deuxième tranche, des propriétés thermophysiques. La Figure 9.10 montre la fenêtre de B5EES qui effectue cette action.

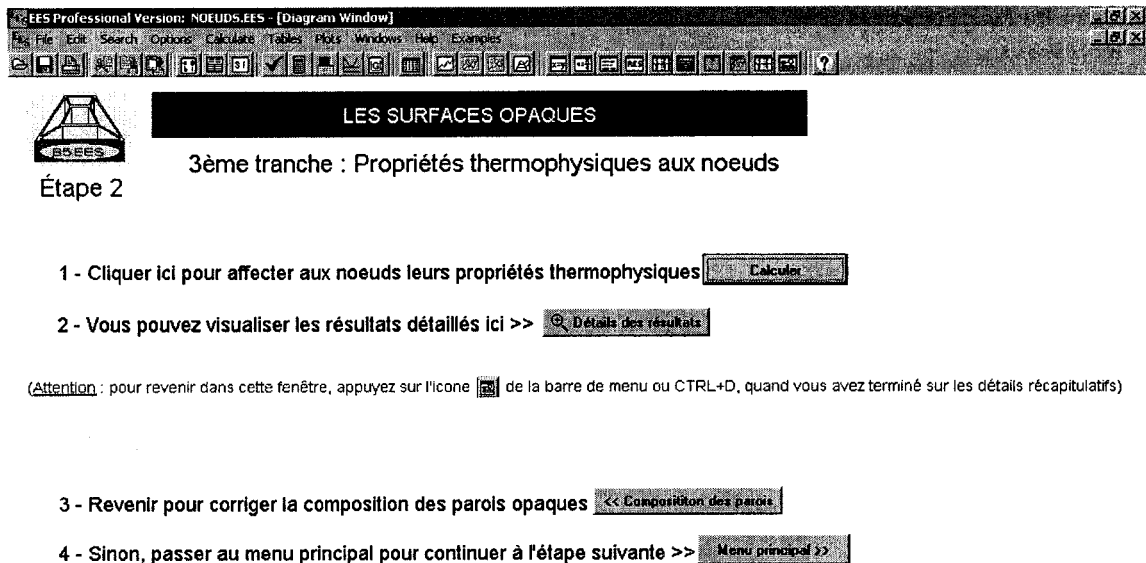


**Figure 9.10 :** Affectation des propriétés thermophysiques aux nœuds

Le bouton « Détails des résultats » fait apparaître les propriétés thermophysiques associées à chacun des nœuds des quatre types de parois (Figure 9.11). Les numéros des lignes correspondent aux rangs des nœuds dans les parois. La première colonne  $X_i$  affiche l'abscisse des nœuds dans les parois opaques, le nœud sur la face extérieure étant positionné à l'origine des abscisses. La deuxième colonne est la conductivité thermique  $\lambda_i$  du matériau où se trouve le nœuds, alors que la troisième correspond à la conductivité thermique effective,  $\gamma_i$ , entre un nœud et celui qui le succède. Enfin la colonne 5 affiche les chaleurs massiques aux nœuds.

|        | Noeuds du mur extérieur | Noeuds du toit         | Noeuds du plancher    | Noeuds de la cloison  |                     |
|--------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
|        | 1                       | 2                      | 3                     | 4                     | 5                   |
|        | $X_1$<br>[mm]           | $\lambda_1$<br>[W/m.K] | $\gamma_1$<br>[W/m.K] | $\rho_1$<br>[kg/m**3] | $Cp_1$<br>[kJ/kg.K] |
| Row 1  | 0                       | 1.436                  | 1.436                 | 881                   | 1.67                |
| Row 2  | 4.8                     | 1.436                  | 1.436                 | 881                   | 1.67                |
| Row 3  | 9.6                     | 1.436                  | 0.3894                | 881                   | 1.67                |
| Row 4  | 13.67                   | 0.19                   | 0.19                  | 1121                  | 1.67                |
| Row 5  | 17                      | 0.19                   | 0.19                  | 1121                  | 1.67                |
| Row 6  | 20.33                   | 0.19                   | 0.05794               | 1121                  | 1.67                |
| Row 7  | 25.33                   | 0.043                  | 0.043                 | 91                    | 0.84                |
| Row 8  | 32                      | 0.043                  | 0.043                 | 91                    | 0.84                |
| Row 9  | 38.67                   | 0.043                  | 0.3081                | 91                    | 0.84                |
| Row 10 | 67                      | 1.731                  | 1.731                 | 2243                  | 0.84                |
| Row 11 | 117                     | 1.731                  | 1.731                 | 2243                  | 0.84                |
| Row 12 | 167                     | 1.731                  | 0.3753                | 2243                  | 0.84                |
| Row 13 | 195.8                   | 0.061                  | 0.061                 | 481                   | 0.84                |
| Row 14 | 203.4                   | 0.061                  | 0.061                 | 481                   | 0.84                |
| Row 15 | 211                     | 0.061                  | 0.061                 | 481                   | 0.84                |

**Figure 9.11** : Propriétés thermophysiques associées aux noeuds dans le toit composé de E5-C13-B20-E3-E2

Nous avons fini dans les deux premières étapes de définir le bâtiment et les parois qui constituent son enveloppe. Les quatre étapes qui suivent traitent les différentes sollicitations thermiques présentes dans le bâtiment.

### 9.2.4 Étape 3 : Calculs des gains solaires sur les surfaces opaques externes

La Figure 9.12 montre que le sol est couvert de pelouse et le lieu de la simulation se trouve à Montréal.

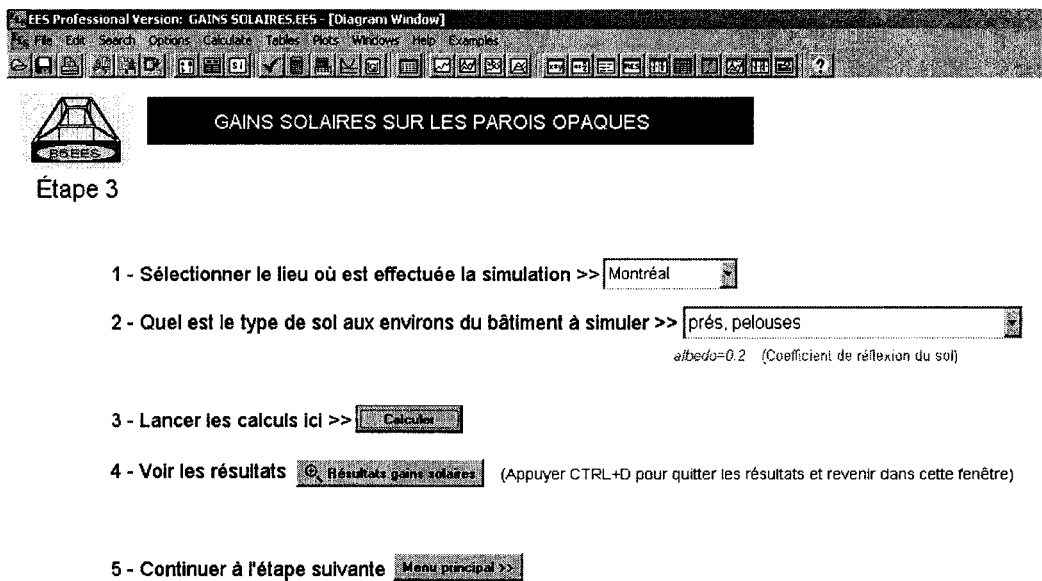


**Figure 9.12 :** Fenêtre du module gains solaires sur les parois opaques

La figure suivante montre les résultats de B5EES issus des conditions de la Figure 9.12.

| Run    | Gains | Gains | Gains  | Gains  | Gains | Gains  | Gains | Gains  | Gains |
|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| Run 1  | 0     | 0     |        |        |       |        |       |        |       |
| Run 2  | 0     | 0     | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Run 3  | 0     | 0     | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Run 4  | 0     | 0     | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Run 5  | 0     | 0     | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Run 6  | 0     | 0     | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Run 7  | 0     | 0     | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Run 8  | 0     | 1     | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Run 9  | 12    | 25    | 6.55   | 7.17   | 4.53  | 4.53   | 0.00  | 7.10   |       |
| Run 10 | 1483  | 159   | 336.99 | 297.44 | 31.39 | 31.39  | 0.00  | 118.47 |       |
| Run 11 | 2406  | 255   | 623.11 | 361.95 | 58.33 | 58.33  | 0.00  | 259.27 |       |
| Run 12 | 2919  | 303   | 813.77 | 264.34 | 76.39 | 76.39  | 0.00  | 364.17 |       |
| Run 13 | 3072  | 319   | 878.02 | 83.97  | 83.97 | 89.52  | 0.00  | 401.07 |       |
| Run 14 | 3092  | 322   | 863.49 | 84.50  | 84.50 | 294.38 | 0.00  | 384.10 |       |
| Run 15 | 2988  | 296   | 772.84 | 75.36  | 75.36 | 461.80 | 0.00  | 312.62 |       |
| Run 16 | 2576  | 242   | 582.67 | 56.61  | 56.61 | 525.39 | 0.00  | 191.87 |       |
| Run 17 | 1774  | 151   | 325.46 | 30.47  | 30.47 | 424.71 | 0.00  | 61.62  |       |
| Run 18 | 3     | 20    | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   |       |

**Figure 9.13 :** Gains solaires sur les surfaces opaques extérieures

### 9.2.5 Étape 4 : Surfaces transparentes

Ce module calcule les gains solaires qui traversent les fenêtres. Les résultats du cas de la Figure 9.14 sont présentés à la Figure 9.15. De plus, après avoir saisi les surfaces des fenêtres le module recalcule les aires des murs extérieurs enlevés de ceux des fenêtres.

EES Professional Version: FENETRES.EES - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

**FENÊTRES EXTÉRIEURES** ? Aide

1 - Que voulez-vous faire? Je vais choisir parmi les fenêtres standard Saisir ici

2 - Choisir dans les 4 fenêtres ci-dessous si vous avez choisi les fenêtres standard ou les charger ici > Load

**FENÊTRE AU SUD** ①

Store et Rideau: aucun

Type de vitrage: double vitrage - Argon 12.7 mm Claire-Claire  $2.7 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$

Type de cadre: Fixe-Bois ou Vinyl

Nombre: 2.2  $\text{[m}^2\text{]}$

autre 31.82 Surface totale = 70

**FENÊTRE À L'EST** ②

Store et Rideau: aucun

Type de vitrage: double vitrage - Argon 12.7 mm Claire-Claire  $2.7 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$

Type de cadre: Fixe-Bois ou Vinyl

Nombre: 2.2  $\text{[m}^2\text{]}$

autre 31.82 Surface totale = 70

**FENÊTRE AU NORD** ③

Store et Rideau: aucun

Type de vitrage: double vitrage - Argon 12.7 mm Claire-Claire  $2.7 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$

Type de cadre: Fixe-Bois ou Vinyl

Nombre: 2.2  $\text{[m}^2\text{]}$

autre 31.82 Surface totale = 70

**FENÊTRE À L'OUEST** ④

Store et Rideau: aucun

Type de vitrage: double vitrage - Argon 12.7 mm Claire-Claire  $2.7 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$

Type de cadre: Fixe-Bois ou Vinyl

Nombre: 2.2  $\text{[m}^2\text{]}$

autre 31.82 Surface totale = 70

**RÉCAPITULATIONS**

Votre choix : FENÊTRES STANDARD

Au Sud, il y a 70  $\text{m}^2$  de fenêtre(s) de  $2.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

À l'est, il y a 70  $\text{m}^2$  de fenêtre(s) de  $2.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Au Nord, il y a 70  $\text{m}^2$  de fenêtre(s) de  $2.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

À l'Ouest, il y a 70  $\text{m}^2$  de fenêtre(s) de  $2.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

[Voir l'équation des gains solaires ici](#)

3 - Calculer les gains solaires traversant les fenêtres Calculer Résultats

4 - Vous pouvez enregistrer les fenêtres pour des utilisations ultérieures Save

5 - Continuer à l'étape suivante Menu principal >>

Figure 9.14 : Saisie des fenêtres et calculs des gains solaires traversant les fenêtres

EES Professional Version: FENETRES.EES - [Parametric Table]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

météo

|        | $\theta_2$ | $G_{\text{ext}}$<br>[KJ/m²] | $G_{\text{int}}$<br>[KJ/m²] | $G_{\text{dB}}$<br>[KJ/m²] | $Q_{\text{TOTAL, WIN, 1}}$<br>[W] | $Q_{\text{TOTAL, WIN, 2}}$<br>[W] | $Q_{\text{TOTAL, WIN, 3}}$<br>[W] | $Q_{\text{TOTAL, WIN, 4}}$<br>[W] |
|--------|------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Run 1  |            |                             |                             |                            |                                   |                                   |                                   |                                   |
| Run 2  | 75.81      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 3  | 62.21      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 4  | 49.04      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 5  | 36.84      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 6  | 27.07      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 7  | 23.07      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 8  | 27.51      | 1                           | 0                           | 1                          | 6.87                              | 6.87                              | 6.87                              | 6.87                              |
| Run 9  | 37.5       | 38                          | 12                          | 25                         | 273.74                            | 308.55                            | 186.52                            | 186.52                            |
| Run 10 | 49.77      | 335                         | 1483                        | 159                        | 15253.62                          | 13074.24                          | 1293.07                           | 1293.07                           |
| Run 11 | 62.98      | 825                         | 2406                        | 255                        | 28552.82                          | 13769.26                          | 2403.04                           | 2403.04                           |
| Run 12 | 76.6       | 1235                        | 2919                        | 303                        | 37461.96                          | 7245.74                           | 3146.84                           | 3146.84                           |
| Run 13 | 90.37      | 1428                        | 3072                        | 319                        | 40486.43                          | 3459.24                           | 3459.24                           | 3468.05                           |
| Run 14 | 104.1      | 1432                        | 3092                        | 322                        | 39724.52                          | 3480.98                           | 3480.98                           | 8285.44                           |
| Run 15 | 117.7      | 1233                        | 2988                        | 296                        | 35387.83                          | 3104.50                           | 3104.50                           | 17811.31                          |
| Run 16 | 130.9      | 828                         | 2576                        | 242                        | 26308.39                          | 2332.09                           | 2332.09                           | 23150.23                          |
| Run 17 | 143.1      | 342                         | 1774                        | 151                        | 13899.32                          | 1255.30                           | 1255.30                           | 19454.49                          |
| Run 18 | 152.9      | 24                          | 3                           | 20                         | 141.89                            | 141.89                            | 141.89                            | 141.89                            |
| Run 19 | 157        | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 20 | 152.5      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 21 | 142.6      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 22 | 130.3      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 23 | 117.1      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 24 | 103.5      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 25 | 89.68      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 26 | 75.9       | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 27 | 62.29      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |
| Run 28 | 49.11      | 0                           | 0                           | 0                          | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              | 0.00                              |

Figure 9.15 : Gains solaires traversant les fenêtres

### 9.2.6 Étape 5 : Échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde

Ce module calcule les facteurs de forme entre les surfaces internes de chacune des zones du bâtiment aux fins des calculs des échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde.

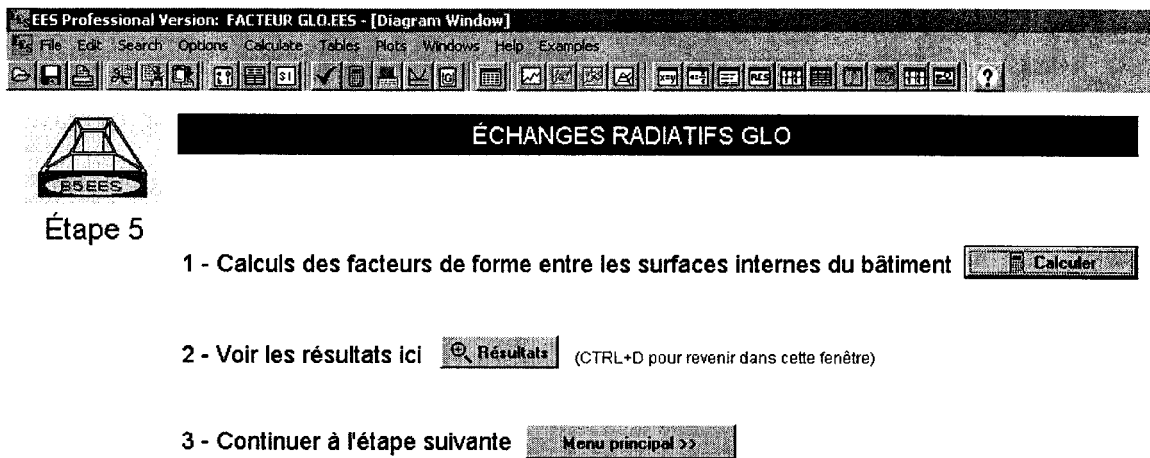


Figure 9.16 : Fenêtre du module « Échange GLO »

On obtient les facteurs de forme, dont l'extrait est montré par la Figure 9.16, correspondant aux surfaces de la Figure 9.17.

| Facteur de forme | Aires       |             |             |             |             |             |             |             |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | $F_{1,1,1}$ | $F_{1,1,2}$ | $F_{1,1,3}$ | $F_{1,1,4}$ | $F_{1,1,5}$ | $F_{1,1,6}$ | $F_{1,1,7}$ | $F_{2,1,1}$ |
| Row 1            | 0           | 0.02129     | 0.2095      | 0.02129     | 0.374       | 0.374       | 0           | 0           |
| Row 2            | 0.1463      | 0           | 0.1798      | 0.02088     | 0.2954      | 0.2954      | 0.06231     | 0.1463      |
| Row 3            | 0.1636      | 0.02124     | 0           | 0.02124     | 0.3642      | 0.3642      | 0.0655      | 0.1636      |
| Row 4            | 0.1463      | 0.02088     | 0.1798      | 0           | 0.2954      | 0.2954      | 0.06231     | 0.1463      |
| Row 5            | 0.1873      | 0.02173     | 0.2413      | 0.02173     | 0           | 0.4581      | 0.06986     | 0.1873      |
| Row 6            | 0.1873      | 0.02173     | 0.2413      | 0.02173     | 0.4581      | 0           | 0.06986     | 0.1873      |
| Row 7            | 0           | 0.02129     | 0.2095      | 0.02129     | 0.374       | 0.374       | 0           | 0           |

Figure 9.17 : Facteurs de forme entre les surfaces internes du bâtiment étudié

| Facteur de forme | Aires                       |                             |                             |                             |                             |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                  | Zone 1<br>[m <sup>2</sup> ] | Zone 2<br>[m <sup>2</sup> ] | Zone 3<br>[m <sup>2</sup> ] | Zone 4<br>[m <sup>2</sup> ] | Zone 5<br>[m <sup>2</sup> ] |
| Row 1            | 163.1                       | 163.1                       | 163.1                       | 163.1                       | 199.8                       |
| Row 2            | 23.55                       | 23.55                       | 23.55                       | 23.55                       | 199.8                       |
| Row 3            | 199.8                       | 199.8                       | 199.8                       | 199.8                       | 199.8                       |
| Row 4            | 23.55                       | 23.55                       | 23.55                       | 23.55                       | 199.8                       |
| Row 5            | 325                         | 325                         | 325                         | 325                         | 3600                        |
| Row 6            | 325                         | 325                         | 325                         | 325                         | 3600                        |
| Row 7            | 70                          | 70                          | 70                          | 70                          | 0                           |

Figure 9.18 : Aires de toutes les surfaces internes

### 9.2.7 Étape 6 : Gains internes

La Figure 9.19 montre comment gains internes du Tableau 9.1 ont été introduits dans B5EES.

**B5EES Professional Version: GAINS INTERNES.EES - [Diagram Window]**

File Edit Search Options Calculators Tables Plots Windows Help Examples

**Étape 6**

**GAINS INTERNES**

|                                           | Personnes                                                                                                                                      | Éclairage                                                            | Équipements                                                         |                                                                        |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>ZONE 1</b><br>325.0 [m <sup>2</sup> ]  | Densité d'occupation: --autre-- 0.07 [pers/m <sup>2</sup> ]<br>130.0 [W/pers]<br>Tâche des occupants: --autre-- 40 [% radiatif]<br>2957.5 [W]  | --autre-- 20.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>60 [% radiatif]<br>6500.0 [W]  | --autre-- 8.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>27 [% radiatif]<br>2892.5 [W]  | radiatif: 6130.2 [W]<br>convectif: 6219.9 [W]<br>total: 12350.0 [W]    |
| <b>ZONE 2</b><br>325.0 [m <sup>2</sup> ]  | Densité d'occupation: --autre-- 0.07 [pers/m <sup>2</sup> ]<br>130.0 [W/pers]<br>Tâche des occupants: --autre-- 40 [% radiatif]<br>2957.5 [W]  | --autre-- 20.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>60 [% radiatif]<br>6500.0 [W]  | --autre-- 8.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>27 [% radiatif]<br>2892.5 [W]  | radiatif: 6130.2 [W]<br>convectif: 6219.9 [W]<br>total: 12350.0 [W]    |
| <b>ZONE 3</b><br>325.0 [m <sup>2</sup> ]  | Densité d'occupation: --autre-- 0.07 [pers/m <sup>2</sup> ]<br>130.0 [W/pers]<br>Tâche des occupants: --autre-- 40 [% radiatif]<br>2957.5 [W]  | --autre-- 20.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>60 [% radiatif]<br>6500.0 [W]  | --autre-- 8.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>27 [% radiatif]<br>2892.5 [W]  | radiatif: 6130.2 [W]<br>convectif: 6219.9 [W]<br>total: 12350.0 [W]    |
| <b>ZONE 4</b><br>325.0 [m <sup>2</sup> ]  | Densité d'occupation: --autre-- 0.07 [pers/m <sup>2</sup> ]<br>130.0 [W/pers]<br>Tâche des occupants: --autre-- 40 [% radiatif]<br>2957.5 [W]  | --autre-- 20.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>60 [% radiatif]<br>6500.0 [W]  | --autre-- 8.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>27 [% radiatif]<br>2892.5 [W]  | radiatif: 6130.2 [W]<br>convectif: 6219.9 [W]<br>total: 12350.0 [W]    |
| <b>ZONE 5</b><br>3600.0 [m <sup>2</sup> ] | Densité d'occupation: --autre-- 0.07 [pers/m <sup>2</sup> ]<br>130.0 [W/pers]<br>Tâche des occupants: --autre-- 40 [% radiatif]<br>32760.0 [W] | --autre-- 20.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>60 [% radiatif]<br>72000.0 [W] | --autre-- 8.0 [W/m <sup>2</sup> ]<br>27 [% radiatif]<br>32040.0 [W] | radiatif: 67903.2 [W]<br>convectif: 68896.8 [W]<br>total: 136800.0 [W] |

1 - Sélectionner une à une les différentes sources de chaleur à l'intérieur des zones et  
2 - Continuer à l'étape suivante

Menu principal >> Calculer

Copyright 2003 - Dan Raudummanicov

Figure 9.19 : Saisie des gains internes dans les cinq zones

### 9.2.8 Étape 7 : Transfert thermique transitoire

Nous sommes maintenant rendu à la dernière étape de B5EES. La Figure 9.20 montre le module « Transfert thermique transitoire » de B5EES. La colonne « Fixe » du tableau de la rubrique 1 permet de fixer ou de laisser fluctuer la température interne d'une zone.

En effet, le choix de l'option « oui » d'un menu tombant active la case de la température de consigne correspondante (dans la deuxième colonne). Tandis qu l'option « non » traduit que tout équipement de chauffage/climatisation est à l'arrêt et que la température de la zone correspondante fluctue en fonction des conditions extérieures et celles des zones avoisinantes.

La Figure 9.20 montre que toutes les températures des cinq zones sont fixées à 22°C.

**TRANSFERTS THERMIQUES TRANSITOIRES**

Étape 7

1 - Fixer les températures de consigne des zones  
en choisissant l'option "oui" dans la colonne Fixe - ou l'option "non" pour les laisser fluctuer

| Zone | Température intérieure [°C] | Fixe |
|------|-----------------------------|------|
| 1    | 22                          | Oui  |
| 2    | 22                          | Oui  |
| 3    | 22                          | Oui  |
| 4    | 22                          | Oui  |
| 5    | 22                          | Oui  |

2 - Constituer le profil d'occupation **Scénario d'occupation**

3 - Si besoin, redéfinir les coefficients de convection, l'émissivité des surfaces, etc. **Autres paramètres**

4 - Calculer les besoins énergétiques des zones **Calculer**

5 - Voir les résultats **Résultats**

6 - Revenir au menu principal **<< Menu principal**

**Figure 9.20** : Fenêtre du module « Transfert thermique transitoire » de B5EES

Nous constituons le profil d'occupation (Figure 9.21) en appuyant sur le bouton « Scénario d'occupation ».

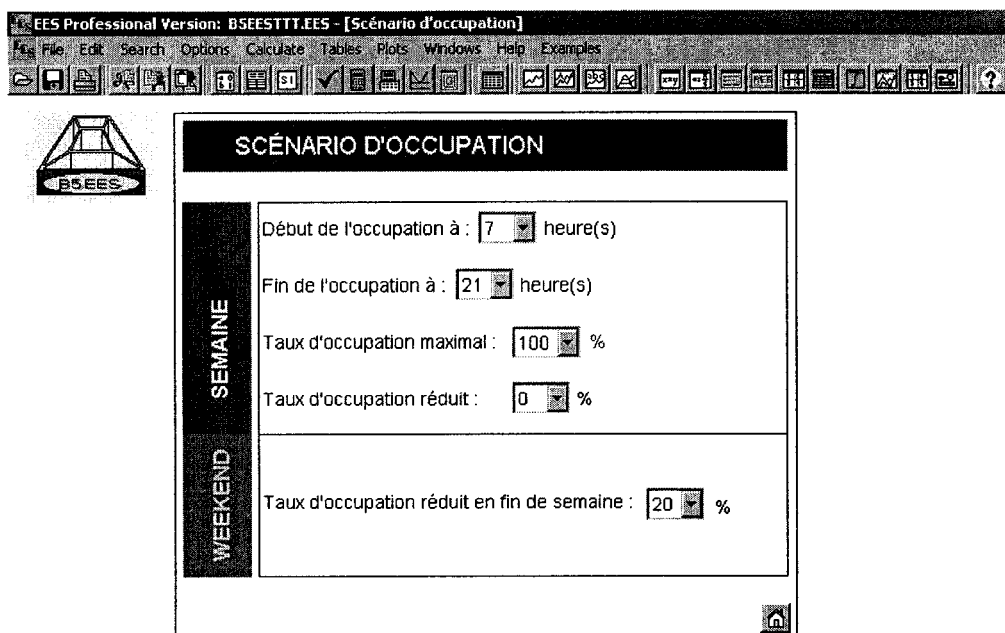


**Figure 9.21 :** Constitution du profil d'occupation

Les autres paramètres liés aux surfaces sont montrés par la Figure 9.22.

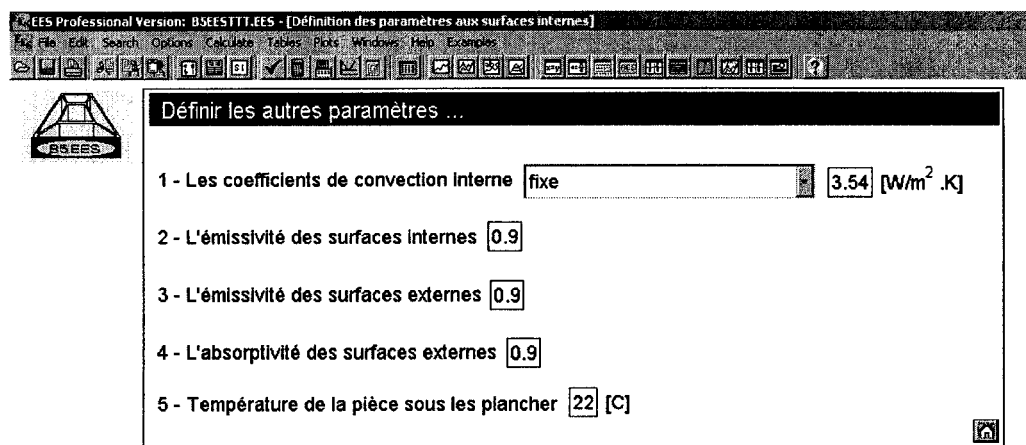


**Figure 9.22 :** Définition des autres paramètres

Et, voici qu'on a fini de définir tous les paramètres requis par B5EES, il est temps de lancer le calcul des besoins énergétiques des cinq zones.

Pour simuler une année complète, B5EES effectue la simulation d'une année complète en 2 heures et 30 minutes avec un PC Pentium 4 de 1,4GHz de processeur et 256 MO de mémoire vive.

### 9.2.9 Branches

Remarquons que nous avons trois branches qui convergent au module « Transfert thermique transitoire » (Figure 9.1) : la branche 1-3-4-5-7, branche 1-6-7 et la branche 2-7. Si après la dernière étape, on veut changer un paramètre dans les modules précédents, il n'est pas nécessaire de repasser toutes les sept étapes de B5EES. Seuls les étapes en aval du module où le changement est effectué sont à refaire. Par exemple, si un paramètre de l'étape 4 a été changé, seules les étapes 4, 5 et 7 doivent être reexécutées.

Le bouton « Résultats » (Figure 9.20) nous ramène à la fenêtre qui accède aux différents graphiques des résultats (Figure 9.23). D'autre part, B5EES affiche les résultats des paramètres qui évoluent en fonction du temps dans une table appelée « Table paramétrique ». L'utilisateur peut se servir de ces résultats pour tracer de nouveaux graphiques avec l'icône « New plot window ».

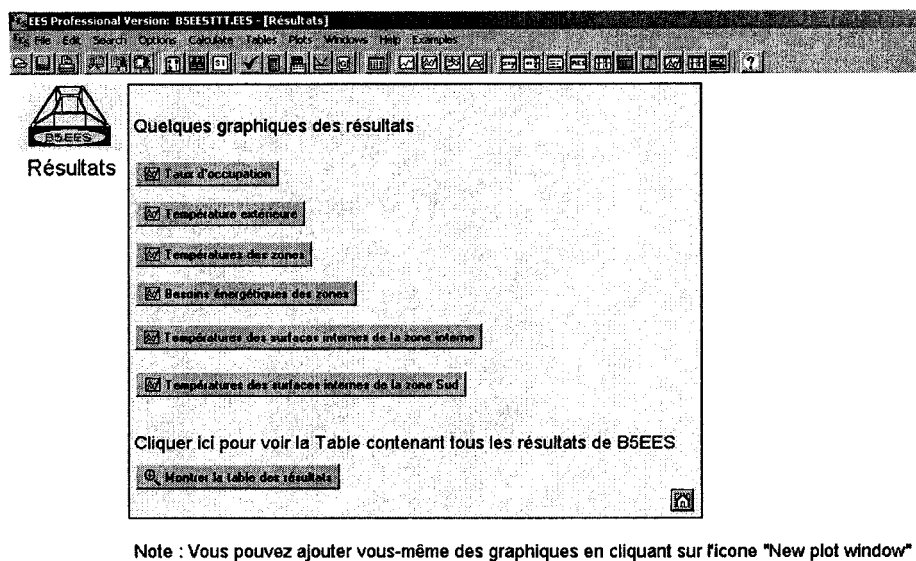


**Figure 9.23 : Fenêtre des résultats**

### 9.3 Résultats

Après avoir effectué les différentes étapes mentionnées à la section 9.2, nous obtenons les résultats suivants.

#### 9.3.1 Cas 1 : Températures intérieures des zones sont fixes

Pour le premier cas, la température à l'intérieur de chacune des cinq zones est fixée à 22°C, aussi bien en période de chauffage qu'en climatisation. Les résultats obtenus nous permettent de tracer l'allure des températures des surfaces internes ainsi que les besoins énergétiques de chacune des zones. Rappelons que les besoins énergétiques sont directement liés aux températures des surfaces internes.

Les cinq graphiques suivantes montrent les besoins énergétiques de chacune des cinq zones du bâtiment étudié pour une année complète.

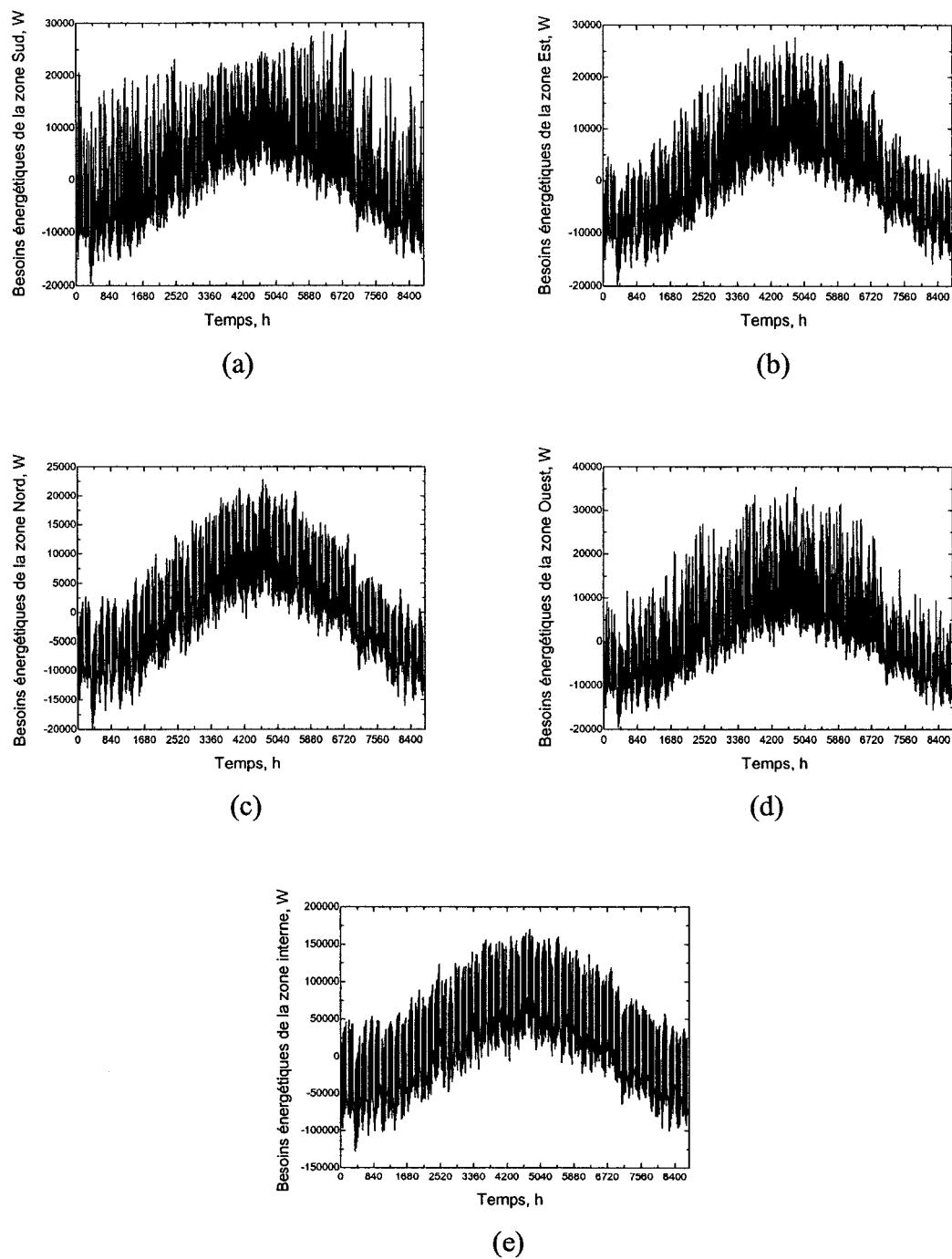


**Figure 9.24 :** Besoins énergétiques des cinq zones du bâtiment étudié

La Figure 9.24 montre que les besoins maximaux en chauffage sont aux environs de 20 kW pour les zones périphériques et 130 kW pour la zone interne. Quant aux besoins maximaux en climatisation, ils de l'ordre de 35 kW pour les zones périphériques et 170 kW pour la zone interne. Ces valeurs peuvent être utilisées pour effectuer le dimensionnement des systèmes de chauffage et de climatisation à installer dans le bâtiment.

Les autres graphiques qui suivent présentent un mois de l'année (mois de janvier) pour mettre en évidence les détails.

Pour la zone interne, la Figure 9.25 révèle une nette différence entre la température de la surface interne du toit par rapport à celles des autres surfaces. Ainsi à  $t=24h$ , la température de la surface interne du toit est de  $18,4^{\circ}\text{C}$  alors que les autres températures se situent à environ  $20,5^{\circ}\text{C}$ . La basse température de la surface interne du toit s'explique par le fait que le toit est soumis aux conditions extérieures hivernales et que les gains solaires sont nuls. Quant aux autres températures, il peut paraître surprenant de constater qu'elles ne sont pas égales à  $22^{\circ}\text{C}$ , la température de l'air sur les deux faces des parois (cloisons et plancher). Ce résultat s'explique par le fait qu'il y a des échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde de la face interne plus froide du toit avec les autres surfaces.

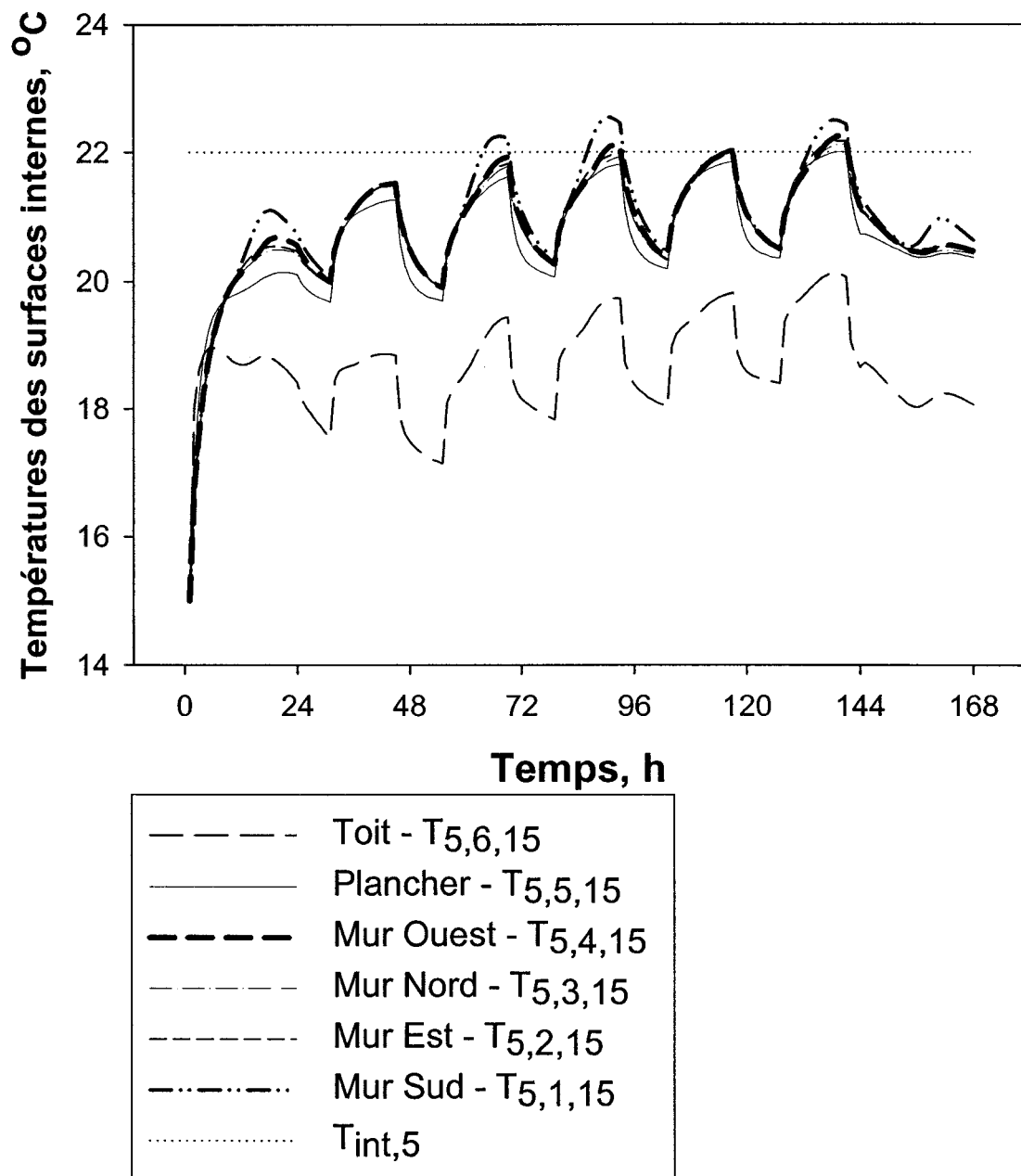


**Figure 9.25 :** Évolution des températures des surfaces internes de la zone interne (Zone 5)

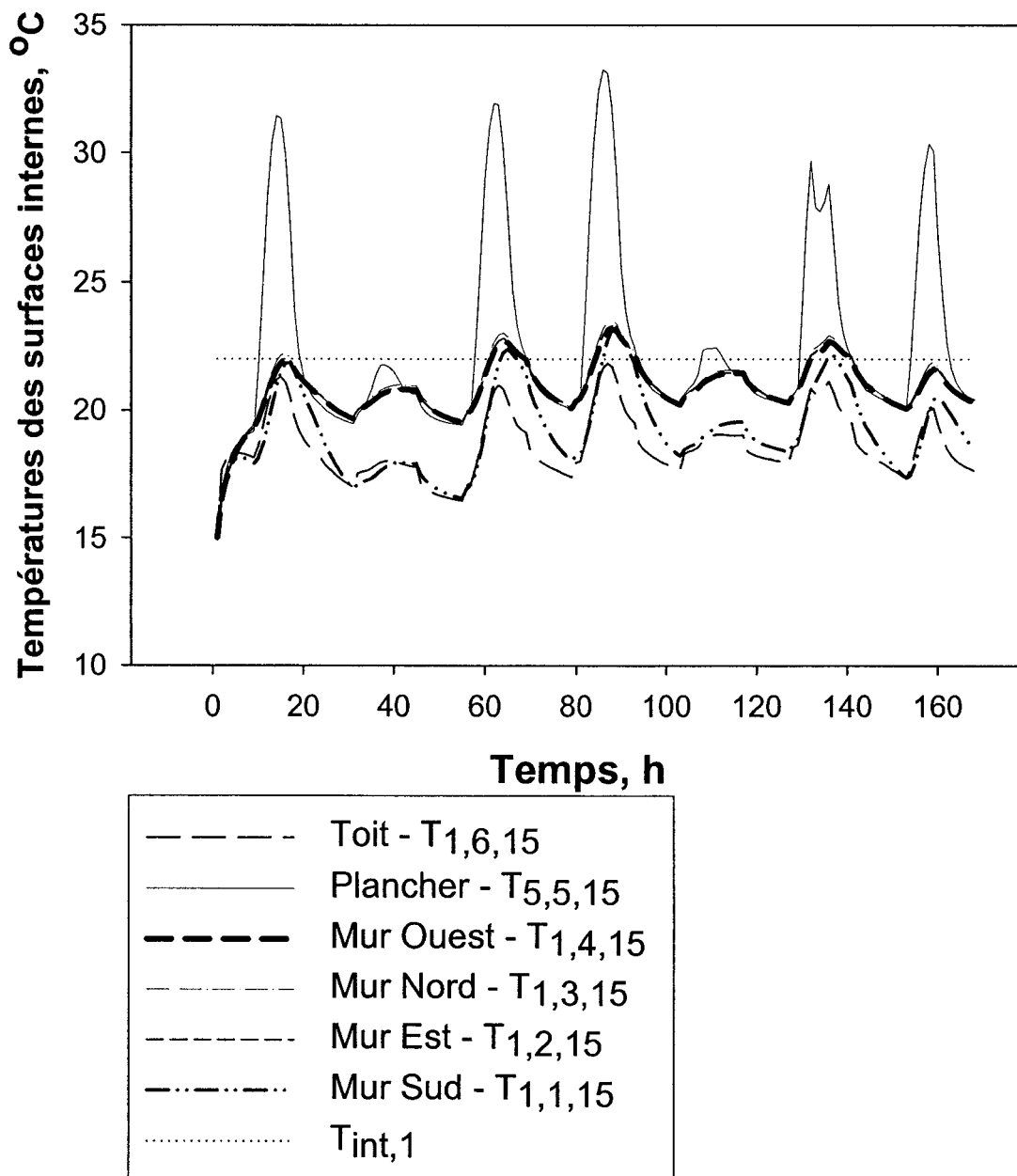


**Figure 9.26 :** Évolution des températures des surfaces internes de la zone périphérique Sud (Zone 1)

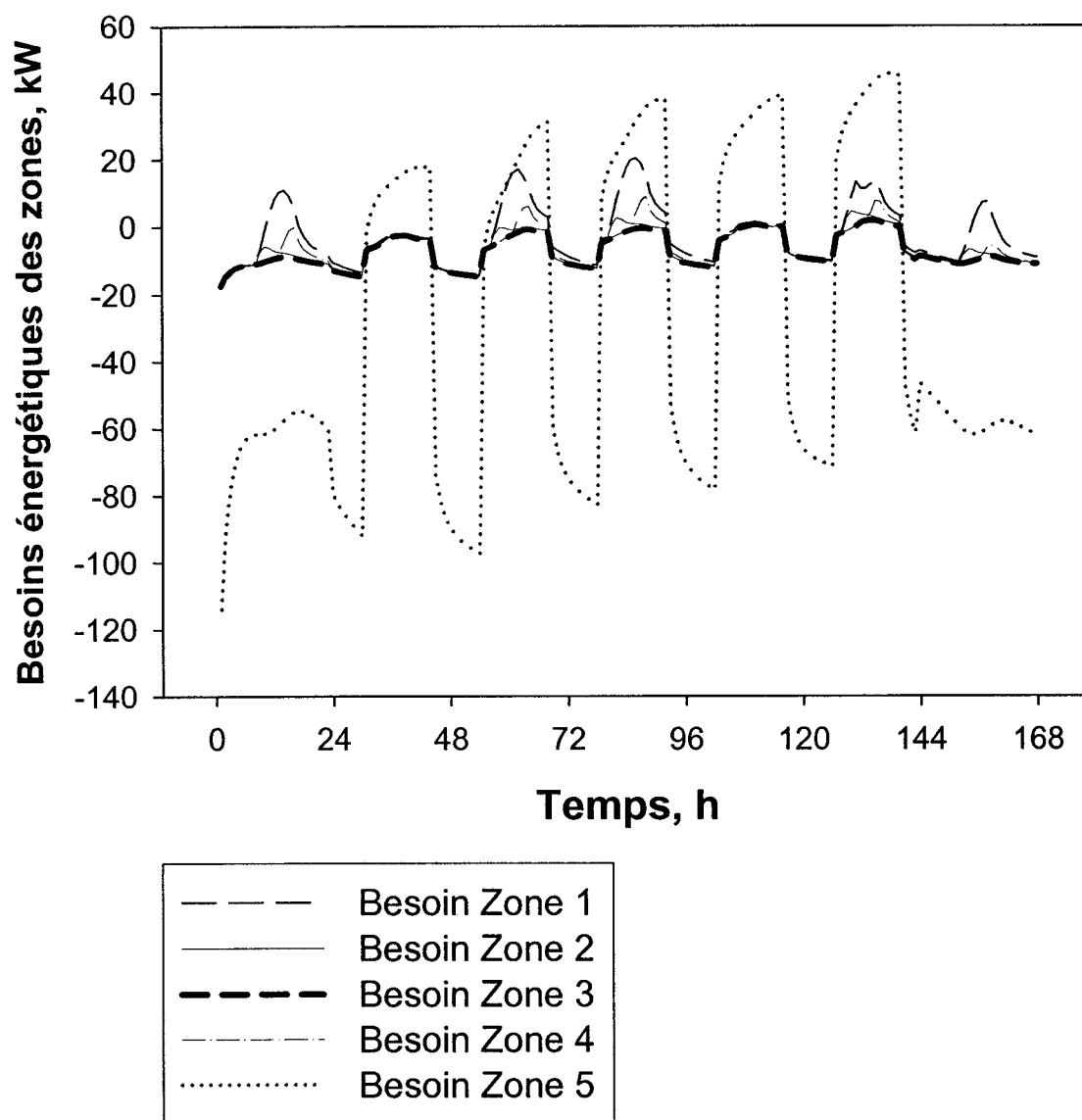


**Figure 9.27 :** Besoins énergétiques des zones

Pour la zone périphérique sud, la Figure 9.26 met en évidence l'importance des gains solaires traversant la fenêtre. Ainsi on constate que la température de la face interne du plancher atteint les 30°C vers le milieu de la journée.

Enfin, la Figure 9.27 fait ressortir clairement l'effet du profil d'occupation pour la zone interne (zone 5). Comme l'importance des gains internes suit l'allure de l'occupation des zones, nous pouvons voir l'allure des façons dont les gains internes sont transformés en besoins énergétiques. De plus, la différence entre les jours de la semaine et les fins de semaines ainsi que les heures d'occupation et de non occupation peut s'expliquer par les niveaux des crêtes et saillies des courbes.

### **9.3.2 Cas 2 : Températures intérieures des zones fluctuant**

Ce deuxième cas est effectué avec B5EES en choisissant l'option « non » dans la colonne « Fixe » pour toutes les zones. Le graphique suivant montre l'évolution des températures de l'air à l'intérieur de chacune des zones lorsque les systèmes de chauffage et de climatisation sont à l'arrêt. Les autres paramètres sont identiques au cas précédent.

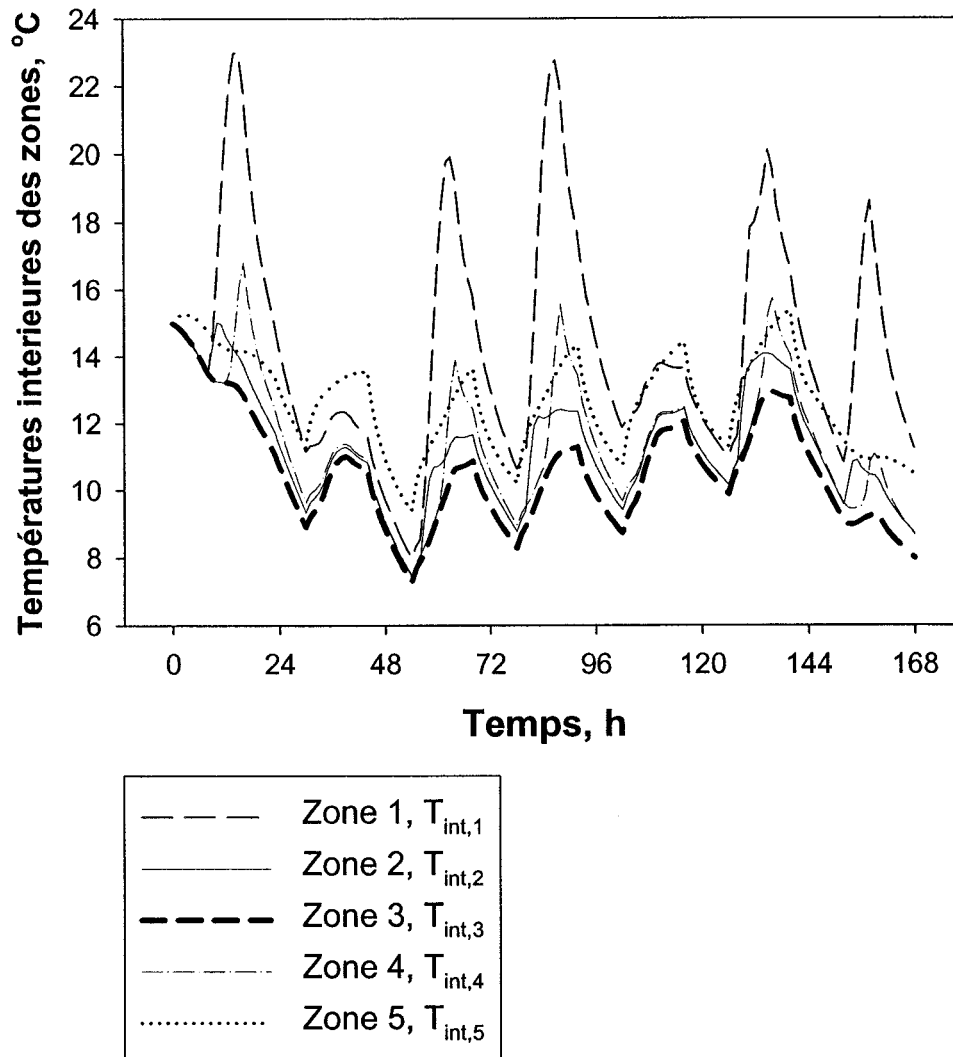


**Figure 9.28 :** Températures intérieures des zones

La figure 9.25 montre une importante variation de la température intérieure de la zone Sud en mi-journée due aux gains solaires importants. La température de la zone intérieure reste généralement à un niveau minimal supérieure aux autres à cause de la grande quantité d'énergie interne générée dans la zone et l'absence de fenêtres. Cet effet est bien visible à la deuxième journée (heures 24 à 48), journée pour laquelle les irradiances solaires sont faibles.

## CONCLUSION

Ce mémoire a permis de développer un nouveau logiciel de simulation énergétique de bâtiment destiné aux études d'avant-projets. Le logiciel, nommé B5EES, évalue les besoins énergétiques horaires d'un bâtiment de cinq zones pendant une année complète. Organisé en modules indépendants accessibles par une interface principale, B5EES est très convivial et nécessite un temps d'apprentissage relativement court. B5EES tient compte du transfert thermique transitoire dans les parois opaques, de la convection et des échanges de grandes longueurs d'onde au niveau des surfaces internes et externes des parois, des gains solaires au niveau des surfaces extérieures, des gains solaires au travers des fenêtres et des gains dus aux sources thermiques internes. A travers les différents chapitres de ce mémoire, les différents phénomènes physiques pris en compte ont été élaborés et modélisés. En voici un résumé.

### 10.1. Contributions de la présente étude

L'enveloppe du bâtiment est constituée de matériaux standard. Les parois opaques peuvent contenir jusqu'à cinq couches. B5EES résout la conduction thermique transitoire au travers les parois opaques par la méthode des différences finies utilisant un schéma temporel complètement implicite. Il a été montré qu'en insérant trois nœuds dans chaque couche, on obtenait un bon compromis entre la vitesse d'exécution et la précision des résultats. Du côté interne, il est possible de choisir un coefficient d'échange convectif fixe ou variable en utilisant les équations de Alamdari et Hammond (Beausoleil-Morrison, 2000). Les échanges par rayonnement de grandes longueurs d'onde sont basés sur un calcul de facteurs de forme approximatif. La méthode proposée par Allard (1986) pour ce calcul est améliorée. Cette dernière s'avère relativement précise et surtout pratique pour un bâtiment à géométrie quelconque.

Les transferts thermiques au travers des fenêtres sont évalués par la méthode du SHGC (*solar heat gain coefficient*) pour calculer les gains solaires, et les facteurs de déperdition thermique  $U$  pour évaluer les pertes thermiques. Quant aux gains internes dans chacune des zones, leurs sources proviennent des occupants, de l'éclairage et des équipements. B5EES permet de traiter l'importance des gains internes au fil d'une journée et au cours de la semaine suivant un profil établi par l'utilisateur en fonction de l'occupation du bâtiment. L'échange thermique au niveau des surfaces extérieures fait intervenir la méthode des températures sol-air de ASHRAE pour tenir compte simultanément de la convection externe, des irradiances solaires et des échanges de grandes longueurs d'onde avec le milieu environnant.

B5EES a été validé en utilisant l'outil de validation analytique de ASHRAE (*Analytical Verification Test Suite Software*, ASHRAE 1052-RP) et les tests de comparaison interlogicielle de BESTEST (Judkoff et Neymark, 1995).

Les résultats de la validation analytique montrent une erreur maximale de 8% pour le besoin énergétique d'un bâtiment à mur thermiquement léger, contre 32% pour un mur thermiquement lourd. Cette erreur relativement importante est due au pas de temps horaire adopté par B5EES et au nombre de nœud relativement faible utilisé. Cependant, il a été démontré que si le pas de temps est réduit à 6 minutes, l'erreur précédente n'est plus que 9%.

La comparaison interlogicielle avec l'outil BESTEST montre que les résultats issus de B5EES se compare favorablement aux résultats produits par des logiciels commerciaux. En effet, les deux cas élémentaires 195 et 270 et les deux cas de qualification 600FF et 900FF ont permis de situer les résultats de B5EES dans les plages de données de référence de BESTEST.

## 10.2. Recommandations

La plupart des phénomènes thermiques importants ont été modélisés dans cette première version du logiciel sauf pour le volet infiltration. Pour compléter le logiciel, il est donc suggéré d'inclure un modèle d'infiltration détaillé. Ensuite il serait utile que le logiciel puisse simuler les cas à plusieurs points de consigne (*deadband* et *setback*) de façon à mesurer l'impact de la régulation des enceintes. Il peut être significatif de considérer aussi les masques proches et lointains. Finalement, il est recommandé de coupler la partie thermique développé au cours de ce travail à des modules de simulation de systèmes CVAC de façon à évaluer la consommation énergétique des bâtiments.

## RÉFÉRENCES

ALLARD, F., INARD, C., ROLDAN, A. (1986). Étude comparative de différentes méthodes de modélisation des échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde dans une cellule d'habitation. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, No. 442, 30-60.

ASHRAE. (1975). Procedure for Determining Heating and Cooling Loads for Computerizing Energy Calculations. Algorithms for Building Heat Transfer Subroutines. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.

ASHRAE. (1997). ASHRAE handbook : Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.

ASHRAE. (2001). ASHRAE handbook : Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.

ASHRAE. (2002). Analytical Verification Test Suite Software. ASHRAE 1052-RP, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.

BEAUSOLEIL-MORRISON. (2000). The Adaptive Coupling of Heat and Air Flow Modelling within Dynamic Whole-Building Simulation. Ph. D. Thesis. University of Strathclyde, UK.

BEAUSOLEIL-MORRISON, I., CALLA, R., MOTTILLO, M., PURDY, J., WYNDHAM-WHEELER, P., LOPEZ, P., DUBROUS, F., LUBUN, M. (2001). Using Building Simulation to Support an Energy-Efficient Incentive Programme. Building Simulation, 7<sup>th</sup> International Conference, Rio de Janeiro, Brazil.

BERNIER, M. A. (2001). Ground-Coupled Heat Pump System Simulation. ASHRAE Transactions, Vol. 107, No. 1, 605-616.

BERNIER, M.A. (1998). Éléments de mécanique du bâtiment. École polytechnique de Montréal, Département de génie mécanique.

BERNIER, M., RANDRIAMIARINJATOVO, D. (2001). Annual Simulations of Heat Pump Systems with Vertical Ground Heat Exchangers. The Canadian conference on building energy simulation – CANMET. eSim 2001, Ottawa, 163-170.

CANMET (2001) url : [http://buildingsgroup.nrcan.gc.ca/ee4/francais/entreeBat\\_f.shtml](http://buildingsgroup.nrcan.gc.ca/ee4/francais/entreeBat_f.shtml)  
page consultée le 5 décembre 2001.

CLARKE, J.A. (1985). Energy Simulation in Building Design. Adam Hilger, Bristol.

CLARKE, J.A. (2001). Energy Simulation in Building Design. Butterworth-Heinemann, Oxford.

CMNÉB/SC, NRC (1999) url : <http://ee4.com>

CRAWLEY, D.B. (2001). EnergyPlus: The Future of Building Energy Simulation. U.S. DOE replaces DOE-2 and BLAST. HPAC Heating, Piping, Air-Conditioning Engineering. Vol. 73 : No. 11, 65-67.

CRAWLEY, D.B., PEDERSEN, C.O., LAWRIE, L.K., WINKELMANN, F.C. (2000). Energy plus: Energy simulation program. ASHRAE Journal. Vol. 42, No. 4, 49-56.

DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. (1991c). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, Inc., New York, Toronto.

EDF. (2001). PAPTER, Programme d'Aide a un Projet TERTiaire Calcul prévisionnel de Consommations. Électricité de France.

HALLÉ, S. (2001). Étude numérique et expérimentale du transfert thermique dans une fenêtre. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de Montréal. Département de génie mécanique.

HONG, T., JIANG, Y. (1997). A New Multizone Model for the Simulation of Building Thermal Performance. Building and Environment, Vol. 32, No. 2, 123-128.

INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P. (1990). Fundamental of Heat and Mass transfer. John Wiley & Sons, New York. 4<sup>e</sup> éd.

JUDKOFF, R.D., NEYMARK, J.S. (1995). International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method. NREL, Colorado.

JUDKOFF, R.D., NEYMARK, J.S. (1999). Adaptation of the BESTEST Intermodel Comparison Method for Proposed ASHRAE Standard 140P: Method of Test for Building Energy Simulation Programs. ASHRAE Transactions. Vol. 105, No. 2, 721-736.

KLEIN, S.A., et al. (1996). TRNSYS : A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.

KLEIN, S.A., ALVARADO, F.L. (2002). EES: Engineering Equation Solver. F-chart software, Middleton.

KOMOR, P. (1997). Space Cooling Demands from Office Plug Loads: Less than one watt per square foot. ASHRAE Journal, Vol. 39, No. 12, 41-44.

KREIDER, J.F. (2001). Handbook of Heating, Ventilation, and Air Conditioning. CRC Press, Collection Mechanical engineering handbook series. Boca Raton, Florida.

LBL (2001). <http://simulationresearch.lbl.gov/dirsoft/d2whatis.html#Validation%20of%20DOE-2> (site consulté le 12 novembre 2001 et 2 décembre 2002)

LEMIRE, N. (1999). Etude sur les systèmes de pompes à chaleur géothermiques. Mémoire de Maîtrise, École polytechnique de Montréal, Département de génie mécanique.

MITALAS, G.P. (1973). Calculating Cooling Load caused by Lights. ASHRAE Journal. Vol. 15, No. 6, 37-40.

NANNEI, E., SCHENONE, C. (1999). Thermal Transients in Buildings: Development and Validation of a Numerical Model. Energy and Buildings. Vol. 29, No. 3, 209-215.

NDIAYE, D. (2001). Optimisation de la conception des bâtiments en fonction de l'énergie utilisée sur toute la durée de vie : application aux conditions économiques du Sénégal. Mémoire de Maîtrise, École polytechnique de Montréal, Département de génie mécanique.

NEYMARK, J., JUDKOFF, R., KNABE, G., LE, H.-T., DURIG, M., GLASS, A., ZWEIFEL, G. (2002). Applying the Building Energy Simulation Test (BESTEST) Diagnostic Method to Verification of Space Conditioning Equipment Models used in Whole-Building Energy Simulation Programs. Energy and Buildings. Vol. 34, No. 9, 917-931.

PATANKAR, S.V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publication, Washington.

REES, S.J., SPITLER, J.D. (1999). Proposals for a Building Loads Diagnostic Test Procedure. ASHRAE Transactions. Vol. 105, No. 2. 514-526.

REES, S.J., XIAO, D., SPITLER, J.D. (2002). An Analytical Verification Test Suite for Building Fabric Models in Whole Building Energy Simulation Programs. 2002 ASHRAE Winter Meeting. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer, Inc. 30-42.

SPITLER, J.D. (1996). Annotated Guide to Load Calculation Models and Algorithms. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.

WALTON, G.N. (1980). A New Algorithm for Radiant Interchange in Room Loads Calculations. ASHRAE Transaction, Vol. 86, 190-208.

WILKINS, C., HOSNI, M.H. (2000). Heat Gain from Office Equipment. ASHRAE Journal, Vol. 42, No. 6, 33-44.

YUILL, G.K., PHILLIPS, E.G. (1981). Comparison of BLAST Program Predictions with the Energy Consumptions of Two Buildings. ASHRAE Transactions, Vol. 87, No.1, 1200-1206.

**ANNEXE A**  
**EXEMPLE DE CALCULS RELATIFS AUX GAINS SOLAIRES AUX**  
**TRAVERS LES FENETRES**

Une pièce d'un immeuble entouré de pelouse installé à Montréal possède deux fenêtres composées de doubles vitrages (12,7mm d'argon – Bronze-LE) sur des cadres fixes en aluminium sur la façade Sud. Les fenêtres sont munies de stores de coefficient d'atténuation égale à 0,75. On veut calculer les gains solaires au travers les fenêtres le 21 juin à 11 heures (Temps Civil).

Localisation de Montréal :

*latitude* = 45,47° N ;

*longitude* = 73,75° W

En tenant compte de l'heure avancée, l'heure solaire à cet instant vaut  $TS = 10,06$  heures

(À titre de vérification, les valeurs des paramètres pour le calcul de  $TS$  sont les suivantes : *Nombre de jour* = 171,4 jours ;  $\delta = 23,45^\circ$  ;  $\alpha = 57,76^\circ$  ; *Longitude de référence* = 75° W ;  $\omega = -29,09^\circ$  ).

Comme le mur est vertical ( $\beta=90^\circ$ ) et orienté vers le Sud ( $\gamma=0^\circ$ ), l'angle d'incidence  $\theta$  vaut  $73^\circ$  ( $\cos\theta = 0,2924$ )

Pour un sol couvert de pelouse, le coefficient de réflexion du sol (l'albédo)  $\rho$  vaut 0,2 (ASHRAE, 1997).

Sur la liste du , le type vitrage des fenêtres utilisé ici correspond à « 19e ». En faisant l'itération sur le pour une valeur de  $\theta = 73^\circ$ , nous obtenons  $SHGC(\theta)=0,2991$ . Et pour un vitrage 19e,  $SHGC$  diffus vaut 0,48. Du , nous avons  $SHGC_{OP} = 0,11$ .

Le fichier météo FMCEG de Montréal donne à cette heure (heure 4114 de l'année) :

$$\begin{aligned} G_{tH} &= 1607 \text{ kJ/m}^2, \\ C_N G_{ND} &= 112 \text{ kJ/m}^2, \\ G_{dH} &= 1517 \text{ kJ/m}^2 \end{aligned}$$

On peut obtenir ainsi les rayonnements solaires direct, diffus et diffus réfléchi tels que :

$$\begin{aligned} E_D &= 32,74 \text{ kJ/m}^2 \\ E_d &= 758,50 \text{ kJ/m}^2 \\ E_R &= 160,70 \text{ kJ/m}^2 \end{aligned}$$

En utilisant l'équation (5.4), on obtient le gain par la portion vitrée,  $q_V = 451.01 \text{ kJ/m}^2$ . Et de la relation (5.5), on a  $q_{OP} = 104,71 \text{ kJ/m}^2$ .

La surface totale des fenêtres, selon le tableau 3, vaut :

$$A = 2 \times 2,2 \text{ m}^2 \text{ dont } 11\% \text{ est opaque.}$$

De plus, l'effet des stores contribue à  $IAC=0,75$

Le rayonnement solaire transformé en gains thermiques à l'intérieur de la pièce au travers les fenêtres, en utilisant la relation (5.6), vaut à la fin :

$$Q_{FEN,TOTAL}=1362,6 \text{ kJ}$$

## ANNEXE B

### RÉSULTATS DE LA CONVERSION EN CINQ D'UN BÂTIMENT

La figure B.1 présente le bâtiment issu de la saisie à la figure 2.1.

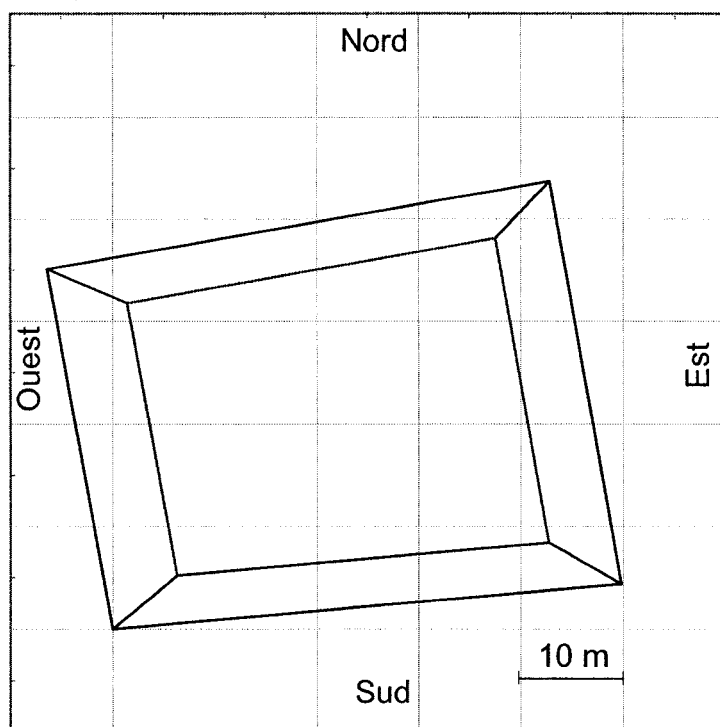


**Figure B.1** : Plan résultant du bâtiment saisi dans la figure 2.1

En se référant à la nomenclature de la figure 2.2, les résultats obtenus pour chacun des paramètres sont les suivants :

L1=50 m

L2=40 m

L3=50 m

L4=35,64 m

$$C1=36,63 \text{ m}$$

$$C2=30,75 \text{ m}$$

$$C3=36,69 \text{ m}$$

$$C4=26,39 \text{ m}$$

$$C5=8,132 \text{ m}$$

$$C6=8,093 \text{ m}$$

$$C7=7,744 \text{ m}$$

$$C8=8,482 \text{ m}$$

$$\chi1=5 \text{ deg,}$$

$$\chi2=100 \text{ deg,}$$

$$\chi3=10 \text{ deg,}$$

$$\chi4=100,3 \text{ deg,}$$

$$SP1=200 \text{ m}^2$$

$$SP2=220 \text{ m}^2$$

$$SP3=200 \text{ m}^2$$

$$SP4=220 \text{ m}^2$$

$$SINT=1047 \text{ m}^2$$

$$ST=1887 \text{ m}^2$$

Ces résultats ont été validés manuellement en utilisant les lois de trapèze et de la trigonométrie.

## ANNEXE C

### FORMAT DU FICHIER MÉTÉO DE B5EES

Le fichier météo LKT de B5EES tel que montré à la figure C.1 comporte 8 colonnes et 8764 lignes. Les huit correspondent aux champs de paramètres météo requis par B5EES tels que le rang de l'heure dans l'année (heure), la pression atmosphérique ( $P_{atm}$ ), la température sèche extérieure ( $T_{ext}$ ), la température de rosée ( $T_{rosée}$ , non utilisée pour cette première version), la vitesse du vent ( $V_{vent}$ , non utilisée pour cette première version), l'irradiation solaire globale horizontale ( $G_{tH}$ ), l'irradiation directe normale avec indice de clarté ( $C_N G_{ND}$ ) et l'irradiation diffuse horizontale ( $G_{dH}$ ). La première ligne contient de valeurs 0 (on ne s'en sert pas pour cette première version). Les lignes 1 à 8761 contiennent les données des 8760 heures d'une année. Les trois dernières lignes renferment respectivement la latitude, la longitude et la longitude de référence du lieu de simulation.

| Montréal | heure | $P_{atm}$              | $T_{ext}$ | $T_{rosée}$ | $V_{vent}$ | $G_{tH}$ | $C_N G_{ND}$ | $G_{dH}$ |
|----------|-------|------------------------|-----------|-------------|------------|----------|--------------|----------|
| Row 1    | 0     | 0                      | 0         | 0           | 0          | 0        | 0            | 0        |
| Row 2    | 1     | 102210                 | -5,9      | -9,1        | 7,2        | 0        | 0            | 0        |
| Row 3    | 2     | 102510                 | -8,6      | -12,1       | 6,7        | 0        | 0            | 0        |
| Row 4    | 3     | 102760                 | -10,7     | -14,3       | 6,7        | 0        | 0            | 0        |
| Row 5    | 4     | 102930                 | -12       | -15,6       | 6,4        | 0        | 0            | 0        |
| Row 6    | 5     | 103020                 | -12,8     | -16,3       | 5,3        | 0        | 0            | 0        |
| Row 7    | 6     | 103080                 | -13,5     | -16,8       | 5          | 0        | 0            | 0        |
| Row 8    | 7     | 103120                 | -13,3     | -16,7       | 5          | 1        | 0            | 1        |
| Row 9    | 8     | 103150                 | -14,4     | -17,8       | 3,9        | 38       | 12           | 25       |
| Row 10   | 9     | 103190                 | -13,9     | -17,8       | 4,4        | 335      | 1483         | 159      |
| Row 11   | 10    | 103180                 | -12,8     | -17,8       | 3,9        | 825      | 2406         | 255      |
| Row 12   | 11    | 103110                 | -11,7     | -16,7       | 3,6        | 1235     | 2919         | 303      |
| Row 13   | 12    | 103010                 | -10,6     | -16,1       | 3,9        | 1428     | 3072         | 319      |
| Row 14   | 13    | 102970                 | -10       | -16,1       | 5,3        | 1432     | 3092         | 322      |
| Row 15   | 14    | 102930                 | -10       | -16,1       | 4,4        | 1233     | 2988         | 296      |
| Row 16   | 15    | 102930                 | -10       | -16,1       | 5,3        | 828      | 2576         | 242      |
| Row 17   | 16    | 102920                 | -10,6     | -16,7       | 5          | 342      | 1774         | 151      |
| Row 8762 | 45,47 | LATITUDE               |           |             |            |          |              |          |
| Row 8763 | 73,75 | LONGITUDE              |           |             |            |          |              |          |
| Row 8764 | 75    | LONGITUDE DE RÉFÉRENCE |           |             |            |          |              |          |

**Figure C.1 : Format du fichier météo LKT de B5EES**

**Un cédérom accompagne ce mémoire de maîtrise**

**Toute personne intéressée à se le procurer doit  
contacter :**

**École Polytechnique de Montréal**

**Service de fourniture de documents**

**B.P. 6079, Succursale Centre-Ville**

**Montréal, Québec H3C 3A7**

**Canada**

**Tél. : (514) 340-4846**

**Télécopieur : (514) 340-4026**