HAL
open science

Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques

Lou Chesné

To cite this version:

Lou Chesné. Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques. Architecture, aménagement de l'espace. INSA de Lyon, 2012. Français. NNT : 2012ISAL0092 . tel-00825646

HAL Id: tel-00825646

https://theses.hal.science/tel-00825646

Submitted on 24 May 2013

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

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

CETHIL
Centre de Thermique de Lyon

MEGA

Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques

Thèse présentée devant

L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

pour obtenir le grade de

Docteur

par

Lou Chesné

Jury

J. CARMELIET	Professeur (EMPA, Zurich, Suisse)	Président de jury
T. DUFORESTEL	Ingénieur Chercheur (EDF R&D)	Examinateur
C. INARD	Professeur (LEPTIAB, La Rochelle)	Rapporteur
M. MUSY	Ingénieur de Recherche, HDR (CERMA, Nantes)	Rapporteur
J-J. ROUX	Professeur (CETHIL, INSA-Lyon)	Directeur de thèse
G. RUSAOUËN	Maître de Conférences (UCBL, Lyon)	Examinateur
P. BAIN	Docteur, Responsable de programme (ANR)	Invité
J-L. HUBERT	Ingénieur Chercheur (EDF R&D)	Invité

Année 2012
Numéro d'Ordre :

Ecole Doctorale MEGA
Mécanique, Énergétique, Génie civil, Accoustique

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2011-2015

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	**CHIMIE DE LYON** **http://www.edchimie-lyon.fr** Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	**ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** **http://edeea.ec-lyon.fr** Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	**EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION** **http://e2m2.universite-lyon.fr** Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43.12.94 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr
EDISS	**INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE** **http://ww2.ibcp.fr/ediss** Sec : Safia AIT CHALAL Insa : M. LAGARDE	M. Didier REVEL Hôpital Louis Pradel Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69677 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax :04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
INFOMATHS	**INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES** http://infomaths.univ-lyon1.fr	M. Johannes KELLENDONK Université Claude Bernard Lyon 1 INFOMATHS Bâtiment Braconnier 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44.82.94 Fax 04 72 43 16 87 infomaths@univ-lyon1.fr
Matériaux	**MATERIAUX DE LYON** Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry Ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	**MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE** Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72.43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	**ScSo*** M. OBADIA Lionel Sec : Viviane POLSINELLI Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.69.72.76 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Geographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Remerciements

Merci à Thierry Duforestel qui m'a proposé ce passionnant sujet de recherche. Merci également de m'avoir guidée tout au long de ce travail, avec patience, pédagogie, ainsi qu'une disponibilité à toute épreuve.

Merci à Jean-Jacques Roux et Gilles Rusaouën pour leur encadrement scientifique régulier, efficace et complémentaire. Merci notamment pour l'aide apportée dans toute les démarches administratives à effectuer à l'INSA.

Merci à Christian Inard et Marjorie Musy qui ont accepté de relire ce manuscrit de thèse et d'en être les rapporteurs. Leurs avis et conseils m'ont été d'une grande aide pour préparer la soutenance. Merci à tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer mon travail, et en particulier à Jan Carmeliet pour avoir assuré la présidence de ce jury.

Merci à l'ensemble du groupe E14 à EDF R&D pour l'accueil qui m'a été réservé et qui a fait de ces trois années de thèse une période très agréable. Merci en particulier à Hassan Bouia et Denis Covalet pour l'aide apportée sur CLIM2000, et à Aurélie Kaemmerlen et Gilles Plessis qui ont pris le relais sur Dymola. Merci également à Mathias Bouquerel, compagnon de thèse, de bureau, de séminaires, pour les bons moments partagés.

Merci à tous les membres du projet VALERIE. Les réunions de projet ont été pour moi des moments très formateurs, d'échanges de points de vue, qui m'ont largement permis de nourrir ma réflexion.

Merci enfin à ma famille, à Benoit, ainsi qu' aux nombreuses personnes qui ont contribué au bon déroulement de cet épisode de ma vie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Résumé

Les règles et usages actuels de conception des bâtiments sont essentiellement basés sur la minimisation des déperditions thermiques. Pour l'enveloppe du bâtiment cela se traduit par une prédominance de son isolation thermique. Or cette logique, surtout poussée à l'extrême, n'est pas nécessairement la plus pertinente car des ressources énergétiques, qu'elles soient des sources ou des puits de chaleur, existent dans l'environnement, et leur apport mériterait d'être pris en considération. Certaines technologies bioclimatiques, et surtout solaires, existent déjà mais leur utilisation n'est pas du tout généralisée à cause d'un manque de repère sur leurs performances. Pour que la démarche bioclimatique puisse être considérée il est nécessaire de pouvoir évaluer à la fois la « qualité énergétique » de l'environnement, et l'aptitude des bâtiments à exploiter cet environnement.

La méthodologie présentée dans cette thèse est basée sur le calcul d'indicateurs de performance bioclimatique issus de simulations numériques de bâtiments dans diverses conditions climatiques. La simulation permet de supprimer facilement une ressource pour pouvoir obtenir les besoins d'un bâtiment non impacté par la ressource. Ces besoins peuvent alors être comparés à chaque instant au potentiel de la ressource afin de déterminer un potentiel utile, valorisable par le bâtiment. Il est également possible de comparer les besoins du bâtiment dans la simulation sans et avec la ressource et d'en déduire la quantité d'énergie provenant de la ressource réellement utilisée par le bâtiment pour couvrir ses besoins. Un jeu d'indicateurs est ainsi défini pour toutes les ressources et tous les besoins d'un bâtiment, et adapté plus particulièrement aux besoins de confort thermique (chauffage et rafraîchissement) et à trois ressources de l'environnement (le soleil, la voûte céleste et l'air extérieur).

Un cas d'étude est alors choisi pour appliquer cette méthode et les résultats sont analysés au niveau du bâtiment tout entier ainsi qu'au niveau de chaque paroi. Une première analyse globale, sur toute l'année, permet de fixer des points de repères sur l'état des ressources et l'exploitation qui en est faite par les bâtiments. Dans un second temps, les résultats instantanés sont analysés de manière dynamique, et montrent que ces nouveaux indicateurs permettent de bien caractériser le comportement d'un bâtiment dans son environnement.

Enfin, les indicateurs sont utilisés dans une approche de conception des bâtiments, et plusieurs pistes sont explorées. Une étude paramétrique est tout d'abord menée et permet d'observer l'influence du niveau d'isolation sur les indicateurs de potentiel et de performance. Puis ces indicateurs sont utilisés pour évaluer la performance bioclimatique de solutions d'enveloppe solaires. Dans un troisième temps, une optimisation de l'enveloppe est menée selon deux critères : un critère classique de minimisation du besoin, mais également un critère bioclimatique de maximisation de l'exploitation du potentiel solaire.

Mots-clés : Potentiel de l'environnement, Ressources énergétiques, Performance bioclimatique, Enveloppe du bâtiment

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Abstract

With the current issues concerning the potential savings in the building sector, reducing building energy consumption is a key point. Up to now, efforts have been focused on insulation to separate the inner ambiance from the fluctuation of the outside air temperature. However, insulating a building from its environment deprives it from the renewable free energy sources which exchange with the envelope, either they are heating or cooling sources. Using the building envelope to exploit these resources is the very principle of the bioclimatic architecture. But bioclimatic systems have never been evaluated regarding the amount of available energy they could use, partly because the energy exchanges between the resources and the building have never been really qualified regarding to the building needs, neither quantified in terms of available energy capacity to meet these needs.

The aim of this thesis is thus to propose a method to assess both :

- the capacity of the environmental resources to cover the building needs,
- the ability of the building to exploit the available energy resources.

The method is mainly based on energy simulation and the basic data is a comparison of the behaviour of a building with and without a given environmental resource. The building energy needs without the resource can be compared to the resource potential and this comparison gives the useful potential of the resource. Moreover, by comparing the building energy needs in the simulation with and without resource, we can get the amount of energy actually used by the building. From these two quantities, the useful and the exploited potential, a set of indicators can be defined and adapted to thermal comfort (heating and cooling needs) and three resources (sun, sky and air).

The indicators are then applied to a study case and the results are analysed not only at the scale of the building, but also at the scale of each part of the envelope. A first analysis of the global results over the year is performed to get a first understanding of the state of the resources and the building performances. In a second step, the values are analysed at each time step, to characterize the behaviour of the building towards the environment.

Finally, the indicators can be used to design buildings, in several ways. We performed a parametric analysis of the insulation level over the potential and performance indicators. Then, we used them to assess the bioclimatic performances of existing solar technologies. In a final step, the indicators have been used as criteria to optimize the building envelope parameters. Thus, the envelope parameters are optimized according to the minimization of the energy need, but also according to the maximization of the exploited potential.

Key-words : Environmental potential, Energy resources, Bioclimatic performance, Building envelope

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Table des matières

Remerciements iii

Résumé v

Abstract vii

Table des matières ix

Nomenclature xv

Table des figures xvii

Liste des tableaux xxv

Introduction 1

1 Contexte et enjeux de l'efficacité énergétique dans les bâtiments : approche bioclimatique et isolation thermique 3

1.1 Architecture bioclimatique 4

1.1.1 L'intégration du bâtiment dans son environnement 4

1.1.2 L'habitat solaire 5

1.2 La réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment 8

1.2.1 L'isolation comme solution d'urgence face à la crise 8

1.2.2 Des projets solaires emblématiques, mais sans suite 9

1.3 Limites de l'isolation thermique comme approche unique 10

1.3.1 Limites de l'approche classique 10

1.3.2 Perspectives 12

2 Ressources de l'environnement et technologies bioclimatiques 13

2.1 Description des ressources énergétiques de l'environnement 14

2.1.1 Introduction : généralités sur les transferts radiatifs 14

2.1.2 Le rayonnement solaire 16

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.3 La voûte céleste . . . 23
2.1.4 L'air extérieur . . . 30
2.2 Technologies bioclimatiques . . . 33
2.2.1 Exploitation du rayonnement solaire . . . 33
2.2.2 Utilisation du rayonnement vers la voûte céleste . . . 46
2.2.3 Utilisation de l'air extérieur . . . 49
2.3 Des ressources utiles peu connues et des technologies bioclimatiques mal évaluées . . . 50

3 Nouvelle approche d'évaluation de la performance bioclimatique des bâtiments 51
3.1 Limites de l'approche classique et bases d'une nouvelle démarche . . . 52
3.1.1 Des technologies bioclimatiques peu utilisées . . . 52
3.1.2 Qualité énergétique de l'environnement . . . 52
3.1.3 Performance bioclimatique de l'enveloppe d'un bâtiment . . . 53
3.1.4 Bases de la nouvelle approche . . . 53
3.2 Mesure de la performance bioclimatique d'un bâtiment : les indicateurs . . . 54
3.2.1 La notion de besoin : besoin résiduel et besoin réel pour chaque ressource . . . 54
3.2.2 Indicateurs de potentiel : simultanéité des ressources et des besoins . . . 55
3.2.3 L'exploitation du potentiel des ressources par la comparaison entre besoin réel et besoin résiduel . . . 57
3.3 Application de cette approche pour le confort thermique d'un bâtiment . . . 59
3.3.1 Indicateurs de besoin . . . 59
3.3.2 Indicateurs de potentiel . . . 61
3.3.3 Indicateurs de performance . . . 67
3.3.4 Indicateurs de contre-performance . . . 71
3.4 Indicateurs au niveau des parois . . . 75
3.4.1 Indicateurs de besoin . . . 75
3.4.2 Indicateurs de potentiel . . . 75
3.4.3 Indicateurs de performance au niveau d'une paroi . . . 77
3.4.4 Indicateurs de contre-performance d'une paroi . . . 81

4 Application à des bâtiments types : analyse des résultats 85
4.1 Description du cas d'étude . . . 86
4.1.1 Modèle de bâtiment . . . 86
4.1.2 Ventilation et système de chauffage/rafraîchissement . . . 89
4.1.3 Scénario d'occupation . . . 89
4.1.4 Météos . . . 90

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.2 Analyse globale des résultats 91
4.2.1 Différence entre le potentiel des ressources et les besoins des bâtiments 92
4.2.2 Mesure de la performance bioclimatique des bâtiments 96
4.2.3 Effets indésirables des différentes ressources 99
4.2.4 Conclusions sur l'analyse globale des résultats 100
4.3 Analyse du comportement des parois par rapport au soleil 102
4.3.1 L'analyse en composantes principales (ACP) 102
4.3.2 L'ACP appliquée aux indicateurs de potentiel et de performance des parois . . . 108
4.4 Analyse dynamique des résultats 113
4.4.1 Examen visuel de la représentation graphique des valeurs instantanées des indicateurs 113
4.4.2 Retard caractéristique d'exploitation des ressources 125
4.4.3 Caractérisation des périodes de manque et de surexploitation des ressources . . . 129
4.4.4 Conclusions sur l'analyse dynamique 138

5 Améliorer les performances bioclimatiques de l'enveloppe du bâtiment 139
5.1 Influence du niveau d'isolation sur les performances bioclimatiques des bâtiments 140
5.1.1 Influence de l'isolation sur la marge bioclimatique 140
5.1.2 Influence de l'isolation sur l'exploitation du potentiel solaire 142
5.1.3 Conclusions sur l'influence de l'isolation 143
5.2 Évaluation de solutions d'enveloppe solaire 144
5.2.1 Présentation des bâtiments et des solutions d'enveloppe 144
5.2.2 Choix des indicateurs à utiliser dans l'analyse 150
5.2.3 Résultats de l'analyse 151
5.2.4 Conclusion : des solutions solaires généralement peu bio-climatiques 153
5.3 L'optimisation numérique : un outil d'aide à la conception 154
5.3.1 Choix de la méthode d'optimisation : l'algorithme génétique 154
5.3.2 Choix des critères d'optimisation 157
5.3.3 Choix des paramètres du modèle à optimiser 158
5.3.4 Résultats de l'optimisation 168
5.3.5 Conclusions de l'optimisation 172

Conclusion 173

Bibliographie 177

A Tableaux des indicateurs de parois 183

B Tableaux des résultats de l'optimisation 187

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Nomenclature

Constantes

σ Constante de Stefan-Boltzmann, $5.67\,10^{-8}\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-4}}$

c Célérité de la lumière dans le vide, $3\,10^{8}\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$

h Constante de Planck, $6.63\,10^{34}\mathrm{J{\cdot}s}$

k Constante de Boltzmann, $1.38\,10^{-23}\mathrm{J{\cdot}K^{-1}}$

Caractères grecs

β Angle d'inclinaison d'une surface avec l'horizontale, rad

λ Conductivité thermique, $\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$

Φ Flux énergétique surfacique, $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$

ρ_a Masse volumique de l'air, $\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$

$\tau couv$ Taux de couverture des besoins par une ressource

τexp Taux d'exploitation d'une ressource

τgen Taux de génération des besoins par une ressource

τ_{ventil} Taux de renouvellement d'air, $\mathrm{vol{\cdot}h^{-1}}$

θ_i Angle d'incidence du rayonnement solaire, rad

θ_z Angle entre la direction du rayonnement solaire et la verticale, rad

ε Émissivité

Indices

a Relatif à l'air extérieur

C Relatif aux besoins de chauffage

c Relatif au ciel

int Relatif à l'air intérieur

n Relatif aux nuages

p Relatif à une paroi

R Relatif aux besoins de rafraîchissement

s Relatif au soleil

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Caractères latins

$\dot{m}$	Débit de ventilation, $\mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}$
Alb	Albédo
B	Besoin énergétique intégré, Wh
b	Besoin énergétique instantané, W
$Bgen$	Besoin généré par une ressource en valeur intégrée, Wh
$bgen$	Besoin généré par une ressource en valeur instantanée, W
C_p	Capacité thermique de l'air, $\mathrm{J \cdot kg^1 \cdot K^{-1}}$
Dif	Flux solaire diffus surfacique, $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Dif_h	Flux solaire diffus horizontal surfacique, $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Dir	Flux solaire direct surfacique, $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Dir_h	Flux solaire direct horizontal surfacique, $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Dir_n	Flux solaire direct normal surfacique, $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
e	Épaisseur, m
F	Facteur de forme entre une paroi et la voûte céleste
g	Facteur solaire
Glo_h	Flux solaire global horizontal surfacique, $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
h	Coefficient de convection, $\mathrm{W \cdot m^2 \cdot K^{-1}}$
K_t	Indice de clarté
N_e	Nébulosité, octas
P_{vap}	Pression partielle de vapeur d'eau, Pa
Paj	Potentiel ajusté intégré d'une ressource, Wh
paj	Potentiel ajusté instantané d'une ressource, W
$Pconc$	Potentiel concomitant intégré d'une ressource, Wh
$pconc$	Potentiel concomitant instantané d'une ressource, W
$Pexp$	Potentiel exploité intégré d'une ressource, Wh
$pexp$	Potentiel exploité instantané d'une ressource, W
$Ptot$	Potentiel total intégré d'une ressource, Wh
$ptot$	Potentiel total instantané d'une ressource, W
R	Résistance thermique, $\mathrm{m^2 \cdot K \cdot W^{-1}}$
S	Surface, $\mathrm{m^2}$
T_C	Température de consigne de chauffage, °C
T_R	Température de consigne de rafraîchissement, °C

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

T_r	Température de rosée, K
V	Volume, m^3
I	Intensité énergétique monochromatique, $\mathrm{W{\cdot}m^{-3}{\cdot}sr^{-1}}$
P	Puissance, W
T	Température, K
U	Coefficient de transmission thermique, $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}}$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Table des figures

1.1 Prairie house (Franck Lloyd Wright) 4

1.2 Fallingwater house de Franck Lloyd Wright (Pennsylvanie, 1935) 5

1.3 Hémicycle solaire de Franck Lloyd Wright (Wisconsin, 1944-1948) 6

1.4 Mur capteur à eau de Steve Baer (Nouveau Mexique, 1971) 6

1.5 Skytherm d'Harold Hay (Arizona, 1973) 7

1.6 Maison Trombe à Odeillo 7

1.7 Évolution des besoins de chauffage d'une maison individuelle dans le climat de Trappes en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité égale à $0.034\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$) 11

2.1 Schéma des interactions énergétiques entre un bâtiment et son environnement 14

2.2 Intensité spectrale du rayonnement de corps noirs à des températures différentes (loi de Planck) 15

2.3 Rayonnement solaire idéal extraterrestre tel que reçu en haute atmosphère (trait fin, axe gauche). Rayonnement d'un corps noir à température ambiante (288 K, trait plein, axe de droite). D'après [Clus, 2007] 15

2.4 Schéma explicatif de la constante solaire 16

2.5 Pyranomètre du site EDF R&D des Renardières mesurant le flux global horizontal Glo_h 17

2.6 Pyranomètre à boule et à bandeau circulaire du site EDF R&D des Renardières mesurant le flux diffusé horizontal Dif_h 18

2.7 Pyrhéliomètre du site EDF R&D des Renardières mesurant le flux direct normal Dir_n . . 18

2.8 Spectre solaire au sommet de l'atmosphère (par comparaison au spectre d'émission d'un corps noir à $5900\,\mathrm{K}$), et à la surface terrestre 19

2.9 Comparaison de spectres solaires diffus et direct (base de données du NREL) 20

2.10 Flux directs et diffus au niveau de l'atmosphère et de la paroi 20

2.11 Incidence du rayonnement solaire direct sur une surface inclinée 21

2.12 Pyrgéomètre du site EDF R&D des Renardières 23

2.13 Valeurs des paramètres a et b dans l'expression de l'émissivité apparente ε_0 du ciel par temps clair en fonction de la pression partielle de vapeur d'eau P_{vap} pour différents lieux ([Daguenet, 1985]) 27

2.14 Comparaison de différentes formules donnant la température de ciel clair à Trappes pour le mois de juillet 29

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.15 Comparaison des températures de ciel obtenues à partir de la formule de Martin et Berdahl ([Martin et Berdahl, 1984]) pour un ciel clair (équation 2.23) et un ciel nuageux (équation 2.23 et 2.24) à Trappes pour le mois de juillet 29

2.16 Température moyenne et flux solaire moyen à Marseille et Trappes pour chaque mois de l'année 30

2.17 Différence des température moyenne diurne et nocturne à Marseille et Trappes pour chaque mois de l'année 31

2.18 Phénomène d'îlot de chaleur urbain d'après [Oke, 2002] 32

2.19 Traitement du flux solaire incident sur une surface en fonction des coefficients de transmission τ, de réflexion ρ et d'absorption α 33

2.20 Spectres de transmission de deux vitrages de Saint-Gobain (d'après [Saint-Gobain, 2007]) 34

2.21 Variation des coefficients radiatifs d'un vitrage ordinaire en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement direct (d'après [Cardonnel, 1983]) 34

2.22 Coefficient de transmission thermique U_g et facteur solaire g de cinq vitrages (d'après [Saint-Gobain, 2007]) et bilans thermiques associés pour différentes conditions de température et d'ensoleillement 36

2.23 Exemple de diagramme solaire (d'après [Mazria, 1979]) 37

2.24 Classement de différents types de vitrages en fonction de leur efficacité dans la réduction des besoins de rafraîchissement et d'éclairage (d'après [Granqvist *et al.*, 2010]) 38

2.25 Transmittivité et réflectivité spectrale de l'oxyde de vanadium pour deux températures situées de part et d'autre de sa température de transition (d'après [Granqvist *et al.*, 2010]). 38

2.26 Températures de différents films d'oxyde de vanadium dopés au tunsgstène (W) et au fluor (F) (d'après [Burkhardt *et al.*, 2002]). 39

2.27 Mode de fonctionnement hivernal et estival de la fenêtre réversible de [Etzion et Erell, 2000] 40

2.28 Deux prototypes de la fenêtre réversible de [Erell *et al.*, 2004] 41

2.29 Modes de fonctionnement en hiver et en été de la « liquid window » de [Carbonari *et al.*, 2012] 41

2.30 Différentes modes de circulation de l'air dans la paroi d'après [Loncour *et al.*, 2004] . . 43

2.31 Exemple de toiture végétale à Göteborg en Suède 44

2.32 Exemple de toit recouvert d'une peinture réflective (source : [Bozonnet *et al.*, 2011]) . . 47

2.33 Courbes de réduction des besoins en fonction de l'augmentation de la réflectivité pour différents climats et différents niveaux d'isolation (source : [Synnefa *et al.*, 2007]) 47

2.34 État de surface et vision infra-rouge des différents échantillons pour la couleur bleue d'après [Karlessi *et al.*, 2009] 48

2.35 Efficacité de la surventilation nocturne dans des bâtiments résidentiels à Athènes en fonction des besoins de rafraîchissement initiaux et du taux de renouvellement d'air appliqué (d'après [Santamouris *et al.*, 2010]) 49

3.1 Diagramme général des indicateurs 58

3.2 Besoins avec et sans soleil d'une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et été à droite) 60

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.3 Besoins avec et sans ciel d'une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et été à droite) 60
3.4 Besoins avec et sans air d'une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et été à droite) 61
3.5 Potentiel total du soleil pour une maison individuelle non isolée dans deux climats différents en hiver 62
3.6 Potentiel total du ciel pour une maison individuelle non isolée dans deux climats différents en été 62
3.7 Potentiel total de l'air pour une maison individuelle non isolée dans deux climats différents en été 63
3.8 Potentiel concomitant du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite) 64
3.9 Potentiel concomitant du ciel pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite) 64
3.10 Potentiel concomitant de l'air pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite) 65
3.11 Potentiel ajusté du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite) 66
3.12 Potentiel ajusté du ciel pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite) 66
3.13 Potentiel ajusté de l'air pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite) 67
3.14 Potentiel exploité du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite) 68
3.15 Potentiel exploité du ciel pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite) 69
3.16 Potentiel exploité de l'air pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite) 69
3.17 Taux de couverture des besoins par les trois ressources (soleil, ciel et air) pour une maison individuelle non isolée sur plusieurs séquences de l'année 70
3.18 Taux d'exploitation des trois ressources (soleil, ciel et air) pour une maison individuelle non isolée sur plusieurs séquences de l'année 71
3.19 Besoins de rafraîchissement avec et sans soleil et besoin généré par le soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (été à gauche et mi-saison à droite) 72
3.20 Besoins de chauffage avec et sans ciel et besoin de chauffage généré par le ciel pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite) 72
3.21 Besoins de chauffage avec et sans air et besoin de chauffage généré par l'air pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite) 73

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.22 Taux de génération des besoins par les trois ressources (soleil, ciel et air) pour une maison individuelle non isolée sur plusieurs séquences de l'année 74

3.23 Potentiel total du soleil sur les murs d'une maison individuelle selon leur orientation en mi-saison 75

3.24 Potentiel total du ciel sur les murs d'une maison individuelle selon leur orientation en été 76

3.25 Potentiel total et concomitant du soleil sur les murs d'une maison individuelle selon leur orientation (est et ouest) et besoins de chauffage réels (sans soleil) de la zone en mi-saison 76

3.26 Potentiel total et concomitant du ciel sur les murs d'une maison individuelle selon leur orientation (Est et Ouest) et besoins de rafraîchissement réels (sans ciel) de la zone en mi-saison 77

3.27 Potentiel solaire exploité par deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite) 78

3.28 Potentiel du ciel exploité par deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite) 79

3.29 Taux de couverture des besoins au niveau de deux types de parois (mur et fenêtre) par le soleil et le ciel 80

3.30 Taux d'exploitation du soleil et du ciel par deux types de parois (mur et fenêtre) 81

3.31 Besoin de rafraîchissement généré par le soleil au niveau de deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite) 82

3.32 Besoin de chauffage généré par le ciel au niveau de deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite) 83

4.1 Maison INCAS de l'INES à Chambéry 86

4.2 Modélisation bi-zone de la maison INCAS avec vide sanitaire et combles 87

4.3 Synthèse des quatre cas testés 90

4.4 Différence entre le potentiel des ressources et les besoins réels associés (chauffage pour le soleil et rafraîchissement pour le ciel et l'air) sur une année 92

4.5 Différence entre le potentiel solaire concomitant et les besoins de chauffage réels pour chaque mois (à gauche) et chaque semaine (à droite) 94

4.6 Différence entre le potentiel solaire concomitant et les besoins de chauffage réels quotidiens 94

4.7 Potentiel concomitant annuel du soleil et du ciel sur les murs et les fenêtres dans les différentes configurations de la maison INCAS 95

4.8 Potentiel concomitant annuel du soleil et du ciel en fonction de l'orientation des parois de la maison INCAS 95

4.9 Taux de couverture des besoins et taux d'exploitation des ressources dans les différentes configurations 96

4.10 Potentiel exploité annuel du soleil et du ciel et taux d'exploitation par les murs et les fenêtres dans les différentes configurations de la maison INCAS 97

4.11 Potentiel exploité annuel du soleil et du ciel et taux d'exploitation en fonction de l'orientation des parois de la maison INCAS 98

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.12 Effets indésirables des ressources sur les bâtiments exprimés sous forme de taux de génération (à gauche) et sous forme d'impact global (à droite) 99

4.13 Exemple de jeu de données multidimensionnel (m individus $*$ n variables) où x_{ij} est la valeur prise par la variable j pour l'individu i et tableau de données centrées-réduites (à droite) avec $\bar{x_j}$ et s_j moyenne et écart-type de la variable j 103

4.14 Représentation du nuages des individus dans l'espace des variables (à gauche) et représentation du nuage des variables dans l'espace des individus (à droite) 104

4.15 Construction de la base $\{V\}$ des composantes principales 105

4.16 Cercle des corrélations entre les variables 106

4.17 Ellipses de confiance autour des individus pour les deux modalités d'une variable 107

4.18 Structure du tableau de données utilisé dans l'ACP 108

4.19 ACP sur les toutes les parois 109

4.20 ACP sur les fenêtres 110

4.21 ACP sur les murs 111

4.22 Besoins de chauffage réels et résiduels pour le soleil 114

4.23 Besoins de rafraîchissement réels et résiduels pour le ciel 115

4.24 Besoins de rafraîchissement réels et résiduels pour l'air 116

4.25 Différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant, ainsi qu'entre le potentiel concomitant et le potentiel ajusté du soleil tout au long de l'année 117

4.26 Différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant, ainsi qu'entre le potentiel concomitant et le potentiel ajusté du ciel tout au long de l'année 118

4.27 Différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant, ainsi qu'entre le potentiel concomitant et le potentiel ajusté de l'air tout au long de l'année 119

4.28 Potentiel total et concomitant de l'air sur une séquence d'été 120

4.29 Potentiels concomitant et exploité du soleil et besoins de chauffage sans soleil en hiver . 121

4.30 Potentiels concomitant et exploité du ciel et besoins de rafraîchissement sans ciel en été . 123

4.31 Potentiels concomitant et exploité de l'air et besoins de rafraîchissement sans air en été . 124

4.32 Potentiel concomitant et potentiel exploité du soleil 126

4.33 Analyse des inter-corrélations entre le potentiel concomitant et le potentiel exploité du soleil 126

4.34 Potentiel concomitant et potentiel exploité du ciel 127

4.35 Analyse des inter-corrélations entre le potentiel concomitant et le potentiel exploité du ciel 127

4.36 Potentiel concomitant et potentiel exploité de l'air 128

4.37 Analyse des corrélations croisées entre le potentiel concomitant et le potentiel exploité de l'air 128

4.38 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel solaire par la maison INCAS en version BBC à Marseille 130

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.39 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel solaire par la maison INCAS en version BBC à Trappes 130

4.40 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel solaire par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Marseille 131

4.41 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel solaire par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Trappes 132

4.42 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel du ciel par la maison INCAS en version BBC à Marseille 133

4.43 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel du ciel par la maison INCAS en version BBC à Trappes 133

4.44 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel du ciel par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Marseille 134

4.45 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel du ciel par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Trappes 134

4.46 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel de l'air par la maison INCAS en version BBC à Marseille 136

4.47 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel de l'air par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Marseille 136

4.48 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel de l'air par la maison INCAS en version BBC à Trappes 137

4.49 Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel de l'air par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Trappes 137

5.1 Besoins de chauffage réels, potentiel solaire concomitant et marge bioclimatique annuels de la maison INCAS à Trappes en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité $\lambda = 0.035\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$) 140

5.2 Différence entre potentiel solaire concomitant et besoins de chauffage réels de la maison INCAS à Trappes en hiver en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité $\lambda = 0.035\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$) 141

5.3 Besoins réels et résiduels, potentiel exploité du soleil, et potentiel solaire non exploité par la maison INCAS à Trappes en hiver en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité $\lambda = 0.035\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$) 142

5.4 Taux de couverture des besoins de chauffage et taux d'exploitation du soleil par la maison INCAS à Trappes en hiver en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité $\lambda = 0.035\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$) 143

5.5 Les trois bâtiments modélisés dans le projet VALERIE : maison individuelle INCAS, bâtiment tertiaire du site des Renardières, et immeuble HLM à Montreuil 144

5.6 Schéma de modélisation du mur Trombe non ventilé 147

5.7 Schéma de principe du mur hélio-pariéto dynamique 148

5.8 Composant Nanogel (à gauche) et illustration sur une toiture en polycarbonate (à droite) 149

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.9 Schéma de fonctionnement de l'installation solaire (en mode 2) 150
5.10 Schéma de principe de l'algorithme génétique 156
5.11 Évolution du besoin résiduel optimal et de l'opposé du potentiel exploité optimal de la maison INCAS en version non isolée sur une semaine d'hiver, en fonction du paramétrage de l'algorithme génétique dans Dymola 157
5.12 Nombre de paramètres retenus sur l'année pour les différentes sensibilités testées 162
5.13 Nombre de paramètres retenus sur chaque mois pour les différentes sensibilités testées . 163
5.14 Paramètres influents sur toute l'année pour la version bien isolée 164
5.15 Paramètres influents sur toute l'année pour la version mal isolée 165
5.16 Paramètres influents sur le mois de janvier pour la version bien isolée 166
5.17 Paramètres influents sur le mois de janvier la version mal isolée 167
5.18 Mode de présentation des résultats de l'optimisation 168
5.19 Résultats de l'optimisation pour la version mal isolée 170
5.20 Résultats de l'optimisation pour la version bien isolée 171

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Liste des tableaux

2.1 Valeurs des paramètres a_2 et b_2 dans l'expression de l'émissivité apparente ε_0 du ciel par temps clair en fonction de la température de rosée T_r 27

4.1 Coefficients convectifs 87

4.2 Caractéristiques des parois opaques de la maison BBC 88

4.3 Caractéristiques des parois opaques de la maison avant 1974 88

4.4 Coefficients optiques des parois vitrées 89

4.5 Scénario quotidien de puissance dissipée par les appareils électroménagers 90

4.6 Scénario quotidien de la puissance totale dissipée 90

4.7 Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour le soleil (en $\mathrm{kWh/(m^2{\cdot}an)}$) 91

4.8 Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour le ciel (en $\mathrm{kWh/(m^2{\cdot}an)}$) 91

4.9 Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour l'air (en $\mathrm{kWh/(m^2{\cdot}an)}$) 91

4.10 Liste des variables qualitatives illustratives utilisées dans l'ACP et de leur modalités . . . 107

5.1 Indicateurs de potentiel et de performance des différents bâtiments pour le soleil (valeurs absolues en $\mathrm{kWh/m^2habitable}$) 145

5.2 Liste des technologies solaires avancées testées 146

5.3 Variation des indicateurs absolus pour les bâtiments non isolés 151

5.4 Variation des indicateurs relatifs pour les bâtiments non isolés 152

5.5 Propriétés des parois opaques dans le modèle à optimiser 160

5.6 Propriétés des parois vitrées dans le modèle à optimiser 160

A.1 Indicateurs de potentiel et de performance des parois pour le soleil (valeurs en $\mathrm{kWh{\cdot}m^2}$ de paroi) 184

A.2 Indicateurs de potentiel et de performance des parois pour le ciel (valeurs en $\mathrm{kWh{\cdot}m^2}$ de paroi) 185

B.1 Valeurs optimales obtenues par minimisation du besoin de chauffage résiduel et par maximisation du potentiel exploité pour la version bien isolée sur le mois de janvier, et indices de sensibilité associés 187

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

B.2 Valeurs optimales obtenues par minimisation du besoin de chauffage résiduel et par maximisation du potentiel exploité pour la version mal isolée sur le mois de janvier, et indices de sensibilité associés 188

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Introduction

Les enjeux énergétiques du début du vingt-et-unième siècle dépassent largement le cadre de l'approvisionnement en énergie. Certes, les ressources fossiles se font de plus en plus rares, mais les réserves prouvées laissent encore une marge d'environ cinquante ans pour le pétrole et le gaz, et de plus de cent ans pour le charbon ([BP, 2011]). Les problématiques soulevées par l'épuisement de ces ressources concernent surtout la hausse du prix de l'énergie et donc l'accès pour tous à cette énergie. Or les besoins énergétiques mondiaux augmentent (d'environ 1.6% par an au cours des deux dernières décennies), surtout ceux des pays en développement dont la croissance dépasse largement les 3% ([AIE, 2010]). C'est donc la question d'un accès équitable à un besoin énergétique primaire qui risque de se poser dans les décennies à venir. D'autres problématiques sont soulevées par la croissance des besoins énergétiques, et la satisfaction de ces besoins par des ressources polluantes. En effet, le dioxyde carbone provenant de l'utilisation des ressources fossiles représente plus de la moitié des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique (GIEC 2007). Le changement climatique induit par l'augmentation de la concentration de ces gaz dans l'atmosphère est susceptible d'avoir des conséquences dramatiques, surtout pour les populations fragiles. Les enjeux énergétiques du vingt-et-unième siècle sont donc avant tout des enjeux environnementaux, et donc humains.

Plusieurs solutions sont avancées pour répondre à ces enjeux, parmi lesquelles la réduction des consommations énergétiques, le recours à des énergies propres, renouvelables et locales, le captage et le stockage du dioxyde carbone. C'est dans ce contexte que des acteurs comme le Conseil européen, en 2008, ont impulsé des objectifs ambitieux dans des délais relativement courts : réduction de 20% de la consommation d'énergie, réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre, et proportion de 20% des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie à l'horizon 2020. Le secteur du bâtiment, l'un des plus gros consommateurs d'énergie au niveau mondial, est une cible de choix dans la réduction des consommations. En France, les secteurs résidentiel et tertiaire représentent 43% de la consommation d'énergie finale, et constituent donc le gisement le plus important en termes d'économies d'énergie. Des objectifs en matière d'efficacité énergétique des bâtiments ont donc été annoncés, notamment à travers les textes du Grenelle de l'environnement, et visent à réduire de 28% la consommation énergétique des bâtiments d'ici 2020. Cette situation est inédite, et les défis à relever le sont tout autant : il ne s'agit plus seulement de construire des bâtiments économes, les constructions neuves ne représentant que 1 à 2% du parc de bâtiments, mais bien d'agir sur le parc existant, et ce de manière totalement nouvelle.

Dans cet objectif, deux voies principales sont envisageables pour améliorer la performance énergétique des bâtiments : l'amélioration du rendement des équipements énergétiques (chauffage, rafraîchissement, éclairage, électro-ménager...) et l'amélioration des performances de l'enveloppe des bâtiments. Actuellement, cette dernière voie est principalement envisagée sous l'angle de l'isolation : il s'agit de rendre l'enveloppe la plus étanche possible aux pertes thermiques vers l'extérieur. De ce point de vue, les performances maximales de l'enveloppe ne sont pas loin d'être atteintes : en augmentant l'épaisseur des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

isolants classiques, on limite de plus en plus les déperditions vers l'extérieur. Mais le gain risque de ne pas être à la hauteur des espérances compte-tenu de l'ambition des objectifs affichés. Ce point de vue sur l'enveloppe n'est pourtant pas le seul, car si l'enveloppe d'un bâtiment est une barrière contre les aléas climatiques, elle est également un lien entre l'habitant et son environnement. Et cet environnement n'est pas seulement hostile : il existe des sources d'énergie, même en hiver, et des puits d'énergie, même en été et isoler un bâtiment revient alors à le priver de ces ressources.

Cette conception d'un bâtiment qui exploiterait les ressources de son environnement par le biais de son enveloppe n'est pas nouvelle, elle est plus connue sous l'appellation d'architecture bioclimatique, mais elle n'a jamais réellement réussi à s'imposer comme réponse incontournable aux enjeux d'efficacité énergétique dans le bâtiment. En effet, il est assez difficile de définir des principes de construction systématiquement applicables, alors que cette approche est, par nature, intimement liée au contexte local, à la forme du bâtiment, à son environnement. On constate donc un manque de repères en matière d'évaluation du potentiel énergétique de l'environnement, ne serait-ce que par la définition et la quantification des ressources énergétiques utiles. De plus, les approches actuelles ne permettent pas de connaître l'utilisation faite par les bâtiments de ces ressources. Un projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) a été lancé sur ce thème en février 2009 dans le cadre de l'appel à projets HABISOL : il s'agit du projet VALERIE qui vise a promouvoir la VALorisation par l'Enveloppe du bâtiment des Ressources Immédiatement exploitables de l'Environnement. C'est dans le cadre ce projet que s'inscrit cette thèse. Elle vise à apporter, à partir de la conception d'une nouvelle méthode d'évaluation du potentiel énergétique de l'environnement d'un bâtiment, quelques points de repère sur le sujet.

Dans un premier chapitre, on présentera le contexte de la prise en compte de l'efficacité énergétique des bâtiments au cours du vingtième siècle et notamment de la réduction de leurs besoins énergétiques. Deux voies seront principalement explorées : la voie de l'isolation et la voie bioclimatique. Le deuxième chapitre développera l'approche bioclimatique en détaillant, d'une part, trois ressources énergétiques de l'environnement (le soleil, le ciel et l'air), et d'autre part, les technologies qui cherchent à exploiter ces ressources. Le troisième chapitre nous permettra de poser les bases d'une nouvelle méthode de conception des bâtiments, basée sur l'évaluation du gisement énergétique de leur environnement et de leurs performances bioclimatique. Dans le quatrième chapitre, cette méthode sera appliquée au cas particulier d'une maison individuelle, et les résultats seront analysés non seulement de manière globale, sur toute l'année, mais également de manière dynamique. Le cinquième chapitre présentera des pistes d'utilisation de cette méthode pour améliorer le comportement bioclimatique des bâtiments, en particulier dans l'exploitation du potentiel solaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Chapitre 1

Contexte et enjeux de l'efficacité énergétique dans les bâtiments : approche bioclimatique et isolation thermique

Le secteur du bâtiment est aujourd'hui l'un des premiers postes de consommation énergétique et l'un des principaux responsables des émissions de gaz à effet de serre. Derrière ce constat, les enjeux environnementaux en termes d'épuisement des ressources et de changement climatique sont très importants. La limitation du recours aux énergies fossiles et l'utilisation, notamment en France avec le nucléaire, d'une production d'énergie centralisée soulève d'autres problèmes liés à la gestion et à la distribution de l'énergie, notamment la gestion des pics de consommation hivernaux. Pour ces raisons, de nombreux efforts de recherche se portent sur l'efficacité énergétique des bâtiments et plus précisément sur la réduction de leur consommation énergétique. Cette volonté conduit à deux voies de recherche distinctes :

- Un axe de recherche centré sur l'amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques du bâtiment.
- L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment.

Les efforts de recherche consacrés à l'amélioration des performances énergétiques de l'enveloppe se classent en deux catégories :

- Une voie qualifiée de « bioclimatique » et revendiquée progressivement comme telle depuis les années 1900 et qui considère que le bâtiment doit s'intégrer dans son environnement, notamment en tirant parti des ressources énergétiques qu'on peut y trouver.
- Une voie plus classique largement répandue depuis les années 1970 dans laquelle l'enveloppe du bâtiment est considérée comme un vecteur de pertes d'énergie vers l'environnement, et qui consiste donc à isoler thermiquement le bâtiment de son environnement.

La voie bioclimatique a été portée, surtout en Amérique du nord, par des architectes précurseurs soucieux de rompre avec le style classique et d'adopter une démarche de conception intégrée depuis le choix du site jusqu'à l'utilisation du bâtiment par ses habitants. La volonté de réduire les consommations énergétiques des bâtiments n'est alors que secondaire, voire inexistante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1 Architecture bioclimatique

L'architecture bioclimatique est une manière de construire avec l'environnement. Le concept global est également appelé « architecture climatique » ou « architecture naturelle ». Lorsque la prise en compte de l'environnement se fait aussi dans l'utilisation des matériaux, les émissions de gaz à effet de serre, la gestion de l'eau ou des déchets, ce type d'architecture est appelé « architecture écologique », « architecture durable », ou « architecture verte ». Si l'intégration dans l'environnement est plus spécifiquement axée sur l'utilisation des ressources énergétiques, et plus particulièrement du soleil, on parle d'« architecture solaire », ou d'« architecture passive », ces deux termes pouvant d'ailleurs être combinés.

La nature même de l'architecture bioclimatique, qui est de s'adapter à l'environnement local, fait qu'il est impossible d'en donner une définition plus précise et de détailler des principes de conception généraux. En effet, les conseils que l'on peut trouver dans les manuels d'architecture bioclimatique ne sont applicables que dans un contexte spécifique et relèvent la plupart du temps de connaissances empiriques.

L'objectif principal de cette approche est de concevoir des bâtiments de manière « naturelle », c'est-à-dire en s'inscrivant pleinement dans leur environnement. Un bâtiment bioclimatique doit donc tenir compte du relief du terrain sur lequel il est bâti, de la végétation qui l'entoure, de la course du soleil tout au long de la journée. Dans l'hémisphère nord, on considère donc que les pièces de vie, telles que le séjour et la cuisine doivent être orientées plutôt au sud (ou à l'est, ou à l'ouest), tandis que l'on peut prévoir des espaces tampons (comme les sanitaires ou le garage) le long de la façade nord qui reçoit moins de soleil que les autres orientations.

1.1.1 L'intégration du bâtiment dans son environnement

Dès le début du vingtième siècle, l'architecture traditionnelle occidentale est remise en cause par des architectes qui veulent accorder plus d'importance au confort de l'habitant, à la fonctionnalité de l'habitation et au respect du site de construction. C'est notamment le cas aux Etats-Unis où Franck Lloyd Wright (1867-1959) va, dès les années 1900, proposer une réflexion sur l'intégration de ses bâtiments dans leur paysage en définissant le style des « prairie houses » (figure 1.1).

FIGURE 1.1 – Prairie house (Franck Lloyd Wright)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Ces maisons sont conçues, à la différence de l'architecture victorienne classique, sur un mode horizontal et donc plutôt basses. L'éclairage naturel est favorisé par des différences de hauteur de plafond qui créent des ouvertures assurant également une meilleure ventilation. La récupération des apports solaires est réalisée à l'aide de grandes baies vitrées protégées en été par des débords de toiture. De manière générale ces maisons sont fonctionnelles car moins compartimentées que les maisons victoriennes de l'époque.

Le projet le plus emblématique de la démarche de Franck Lloyd Wright en termes d'intégration d'un bâtiment dans son site naturel reste sa « Fallingwater house » (figure 1.2) construite en 1935 en Pennsylvanie directement sur un rocher surplombant la rivière. La forme de la maison, conçue sur plusieurs niveaux, avec des balcons s'inscrivant dans le paysage à l'image des rochers alentours, font de cette réalisation une référence dans l'histoire de l'architecture bioclimatique.

FIGURE 1.2 – Fallingwater house de Franck Lloyd Wright (Pennsylvanie, 1935)

Mais Franck Lloyd Wright est également un précurseur en matière d'utilisation du rayonnement solaire, notamment parce qu'il a exploré des formes d'habitations diverses permettant de tirer profit des rayons du soleil en hiver tout en s'en protégeant l'été. Son hémicycle solaire (figure 1.3), construit entre 1944 et 1948 dans le Wisconsin, en est l'un des exemples les plus notoires.

L'éclairage naturel est également l'une des composantes de son architecture et il intègrera un puits de lumière central dans la plupart de ses projets, depuis la construction de sa première maison (Oak Park), en passant par le bâtiment d'habitation collective à Buffalo, jusqu'au musée Guggenheim de New-York construit juste avant sa mort en 1959.

1.1.2 L'habitat solaire

La récupération et la gestion des apports solaires pour chauffer et éclairer le bâtiment s'inscrit naturellement dans la continuité de la démarche bioclimatique et s'exprime dès les années 1940 aux Etats-Unis, sous la forme de projets architecturaux expérimentaux qui se multiplient jusque dans les années 1970 sous l'appellation de maisons solaires, ou maisons passives, les deux termes se combinant d'ailleurs.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La principale problématique à laquelle répondent tous ces projets est la récupération des apports solaires d'hiver et leur stockage pour une utilisation nocturne. Les solutions trouvées, sont alors une combinaison d'apports directs et de systèmes capteurs et accumulateurs permettant un déphasage. Différentes techniques sont expérimentées : la façade sud entièrement vitrée avec mur lourd capteur et déphaseur, la ventilation naturelle par effet cheminée, les capteurs à eau, la serre, le mur Trombe.

La Jacobs House II de Franck Lloyd Wright en est l'un des premiers exemples avec son célèbre hémicycle solaire (figure 1.3).

FIGURE 1.3 – Hémicycle solaire de Franck Lloyd Wright (Wisconsin, 1944-1948)

On peut également illustrer cette démarche avec les travaux de David Wright, et notamment la maison de Karen Terry à Santa Fe, Nouveau Mexique, construite en 1974. Elle est conçue sur trois niveaux orientés vers le sud et délimités par des « murs d'eau » qui viennent réguler les apports solaires reçus à travers plusieurs rangées de vitrage en toiture inclinée. Ainsi, la vie dans cette habitation est régulée selon les moments de la journée et de la saison et l'habitant s'adapte aux conditions de température des différents niveaux ([Heschong, 1979]).

Le mur d'eau (figure 1.4) a été également utilisée par Steve Baer dans sa résidence à Corrales au Nouveau Mexique, en 1971, comme moyen d'accumuler de la chaleur et de la restituer à l'intérieur. Il est constitué dans ce cas précis d'un empilement de fûts métalliques horizontaux remplis d'eau devant lequel est disposé un simple-vitrage. La face extérieure des fûts est absorbante et une paroi amovible est placée au sol durant la journée pour réfléchir les apports solaires vers les fûts, et placée contre le mur durant la nuit pour conserver la chaleur à l'intérieur du bâtiment.

FIGURE 1.4 – Mur capteur à eau de Steve Baer (Nouveau Mexique, 1971)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les dispositifs à eau peuvent également se retrouver en toiture. C'est le cas du skytherm (figure 1.5) imaginé en 1967 et testé en Arizona par Harold Hay avant d'être implanté en 1973 sur un bâtiment habité. Le skytherm est une toiture bassin, constituée de poches d'eau qui peuvent être recouvertes par des panneaux isolants. Ainsi, durant les journées d'hiver, la masse d'eau est chauffé par le soleil et la chaleur est restituée dans les pièces intérieures la nuit par rayonnement du plafond, alors que les bassins sont recouverts par l'isolant. En été, les bassins sont rafraîchis par rayonnement avec le ciel et convection avec l'air pendant la nuit, tandis qu'en journée, ils absorbent la chaleur intérieure tout en étant protégés du soleil par les panneaux isolants.

FIGURE 1.5 – Skytherm d'Harold Hay (Arizona, 1973)

Le mur Trombe (figure 1.6) est également un exemple emblématique de mur capteur accumulateur. Il est le fruit de la collaboration de Félix Trombe et de Jacques Michel qui utilisent l'effet de serre créé au sein d'une paroi. Le mur Trombe est composé d'un mur capteur devant lequel est placé un vitrage créant ainsi une lame d'air, elle-même alimentée par une entrée d'air en bas du mur et une bouche de soufflage en haut. Le rayonnement solaire réchauffe alors le mur ainsi que la lame d'air et les calories sont transportées vers l'intérieur à la fois de manière presque instantanée par convection naturelle de la lame d'air, et avec un certain déphasage par rayonnement du mur lourd vers l'intérieur du bâtiment. La première maison Trombe voit le jour à Odeillo dans les Pyrénnées Orientales en 1962.

FIGURE 1.6 – Maison Trombe à Odeillo

C'est également le principe utilisée dans le cas des serres attenantes au bâtiment, qui créent un espace tampon où l'air est préchauffé pour être injecté dans le bâtiment lui-même, tandis que le rayonnement solaire reçu par le mur séparant la serre du bâtiment est accumulé pour être retransmis de manière déphasée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2 La réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment

Les chocs pétroliers des années 1970 vont imprimer, en France, un mouvement général de recherche de gisements d'économie d'énergie et de « chasse au gaspi ». Le secteur du bâtiment est très vite repéré comme propice à la mise en place de mesures drastiques de réduction des consommations énergétiques et les pouvoirs publics vont alors explorer deux voies différentes : d'une part la limitation des pertes thermiques par l'isolation, et d'autre part l'utilisation des apports solaires en s'appuyant sur l'expérience des pionniers, les problématiques étant alors surtout centrées sur les besoins de chauffage à l'époque.

1.2.1 L'isolation comme solution d'urgence face à la crise

Le choc pétrolier de 1974 et la crise énergétique qui s'ensuit impriment une pression sans précédent sur les prix de l'énergie et conduisent les pouvoir publics à initier une politique de réduction des consommations énergétiques, notamment dans le secteur du bâtiment où les gisements potentiels d'économie d'énergie sont repérés comme très importants. Effectivement, jusqu'alors, les bâtiments ne sont pas conçus ni dimensionnés en fonction de leurs besoins énergétiques et ils ne sont par exemple pas isolés du tout. Ainsi, la première réglementation thermique, publiée en 1974 sous la forme d'un arrêté ministériel ([RT1, a]), va imposer une valeur maximale aux déperditions des constructions neuves dans le secteur résidentiel. Est alors introduit le coefficient G (en $\mathrm{W{\cdot}m^{-3}{\cdot}K^{-1}}$) qui caractérise les pertes globales au travers des parois et induites par la ventilation. En 1976 une nouvelle réglementation thermique applicable au secteur non résidentiel introduit un nouveau coefficient G1 (en $\mathrm{W{\cdot}m^{-3}{\cdot}K^{-1}}$) qui ne prend en compte que les pertes thermiques à travers les parois. L'application de ces réglementations thermiques se traduit par le recours systématique à l'isolation et dans le secteur résidentiel à une ventilation plus efficace.

Dans l'ensemble les recommandations sont plutôt bien suivies et vont mener à des économies d'énergie de l'ordre de 30%. Les réglementations thermiques vont ensuite se succéder, imposant des contraintes de plus en plus sévères sur les valeurs acceptables de déperditions thermiques et alterner avec des labels qualifiant les projets allant au-delà des réglementations, impulsant ainsi un mouvement positif au secteur de la construction. Les déperditions maximales voulues par les réglementations thermiques deviennent si faibles qu'il est nécessaire de prendre en compte les apports de chaleur gratuits qu'ils soient internes ou externes aux bâtiments pour évaluer correctement leur bilan énergétique. A partir de 1982 les réglementations thermiques vont ainsi intégrer les puissances d'occupation et les apports solaires, mais de manière forfaitaire seulement.

Entre les différentes réglementations thermiques, des labels sont mis en place afin de récompenser les constructions les plus avancées en termes de réduction de consommation, et de préparer ainsi la réglementation thermique suivante. C'est le cas du label Haute isolation, mis en place en 1980, dont les objectifs seront repris dans la réglementation de 1982 ([RT1, b]). Dans les années 1980, les pouvoir publics investissent dans la recherche sur l'isolation (isolation dynamique, isolation par l'extérieur) et notamment sur de nouveaux matériaux (polystyrène, mousse de polyuréthane...).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2.2 Des projets solaires emblématiques, mais sans suite

La récupération des apports solaires trouve sa justification dans la réduction des consommations énergétiques des bâtiments voulue par les pouvoirs publics dans les années 1970 et au tournant des années 1980 de nombreux programmes de recherche sur l'habitat solaire sont initiés par les pouvoirs publics, et notamment le ministère de l'environnement et du cadre de vie.

Le Comité de la Recherche et du Développement en Architecture finance ainsi plusieurs projets sur une approche bioclimatique de l'architecture visant à dégager des principes de construction bioclimatique suivant les différents climats français. Les rapports finaux sont assez complets et après avoir présenté les caractéristiques détaillées du climat étudié et le comportement thermique des bâtiments, ils proposent quelques principes de conception fondés sur le respect du confort d'été, du confort d'hiver et de mi-saison ([Nicolas et Vaye, 1978]). En région parisienne en hiver, le rapport recommande ainsi de réfléchir en termes de bilan sur l'enveloppe et de prévoir aussi bien de limiter les pertes que d'optimiser les apports gratuits. En été, il est recommandé de privilégier la ventilation naturelle ainsi que les occultations. Une forte inertie est recommandée dans tous les cas pour stocker une partie des apports afin de les restituer au bâtiment lorsqu'il en a le plus besoin. D'autres traités d'architecture bioclimatique comme [Mazria, 1979] et [Camous et Watson, 1983] publiés à la même période, dressent les mêmes constats : dans les climats tempérés, les solutions privilégiées pour l'hiver et l'été s'opposent, mis à part l'utilisation de l'inertie du bâtiment comme déphaseur.

En 1979, est créé le Commissariat à l'Energie Solaire, établissement en partie public, dont le but est de coordonner et de promouvoir le développement de l'énergie solaire. Il organise ainsi, en 1980, le « Concours 5000 maisons solaires » qui vise alors à montrer la faisabilité et l'efficacité de bâtiments utilisant les technologies solaires, et donc à encourager le développement du marché solaire ([COMES, 1982] et [Franca, 1982]). Parmi les 29 projets sélectionnés pour être réalisés à grande échelle, 40% mettent en oeuvre une serre, 40% des capteurs solaires à air et eau, une partie du reste utilisant des murs capteurs et murs Trombe. Le surcoût solaire de la réalisation des projets sélectionnés devait être financé par les pouvoirs publics.

On voit donc qu'à cette période, les aides au développement de l'architecture solaire, y compris passive, se développent. Le comité d'action pour le solaire publie même un « Guide de la France solaire » sous le prétexte de « profiter du soleil et payer moins d'impôts » ([Sol, 1982]).

Cependant, le concours, malgré son ampleur (près de 500 projets ont été présentés), n'aura que peu d'effets concrets sur le développement de solutions solaires pour l'habitat, et les projets réalisés resteront pour beaucoup au stade de l'expérimentation. De plus, mis à part les serres et les panneaux solaires thermiques, peu de technologies matures sont mises en avant à l'époque. L'une des explications proposées est le caractère concurrentiel des murs solaires par rapport aux fenêtres sur la façade sud des maisons ([Franca, 1982]).

L'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (AFME), créée en 1982, va fédérer plusieurs organismes publics oeuvrant à la fois dans les domaines de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Le champ d'action de l'AFME est multiple et va progressivement se concentrer sur la réduction des consommations énergétiques à cause notamment de l'augmentation constante du prix de l'énergie. Ces programmes solaires seront progressivement abandonnés dans les années 1980-1990 au profit de l'isolation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3 Limites de l'isolation thermique comme approche unique

Isoler des anciens bâtiments, dont l'enveloppe était responsable de la majorité des pertes thermiques, a permis de réduire considérablement leur consommation énergétique. De même, dans ces bâtiments bien isolés, l'usage de fenêtres doubles-vitrages et de ventilation double-flux diminue encore les pertes énergétiques de ces deux postes et réduit la consommation du bâtiment. Ces améliorations ont mené à la conception de bâtiments dont les consommations de chauffage ont baissé de moitié par rapport aux bâtiments non isolés construits avant la première réglementation thermique de 1974. Mais l'isolation thermique classique est un processus qui devient de moins en moins efficace au regard des objectifs ambitieux affichés dans les prochaines années. Il semble donc qu'il soit de plus en plus nécessaire de se tourner vers des voies complémentaires de recherche d'autres gisements de performance tant au niveau méthodologique que technologique.

1.3.1 Limites de l'approche classique

Les besoins énergétiques d'un bâtiment sont le résultat du bilan entre apports et pertes à travers son enveloppe, ainsi que des pertes liées au renouvellement d'air. Le recours à l'isolation de l'enveloppe d'un bâtiment permet de limiter les pertes thermiques vers l'extérieur et de diminuer ainsi les besoins du bâtiment. Mais cette diminution n'est pas proportionnelle à l'épaisseur de l'isolant utilisé. En effet, l'aptitude d'une paroi à se laisser traverser par un flux énergétique est caractérisée par son coefficient de transmission thermique U exprimé en $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}}$. Ce coefficient est l'inverse de la résistance thermique totale de la paroi R prenant en compte à la fois les échanges conductifs dans la paroi et les échanges convectifs de chaque côté. L'ajout d'un isolant, de conductivité thermique λ (en $\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$) et d'épaisseur e (en m), modifie la résistance thermique d'origine R_0 de cette paroi. La nouvelle résistance thermique de la paroi s'écrit alors :

$$R = R_0 + \frac{e}{\lambda} \tag{1.1}$$

Et le nouveau coefficient de transmission thermique U s'écrit :

$$U = \frac{1}{R_0 + \frac{e}{\lambda}} \tag{1.2}$$

Les besoins de chauffage d'un bâtiments sont liés à la valeur du coefficient de transmission thermique U de son enveloppe et évoluent de la même manière en fonction de l'épaisseur d'isolant. Pour illustrer cette notion, la figure 1.7 montre l'évolution des besoins de chauffage d'une maison individuelle simulée dans le climat de Trappes en fonction de l'épaisseur d'isolant. Les différents niveaux des réglementations thermiques sont également indiqués sur le graphique.

Il apparaît sur cette figure que les premiers centimètres d'isolant permettent une économie significative sur les besoins de chauffage. Par exemple, pour satisfaire la première réglementation thermique de 1974 ([RT1, a]), qui visait une réduction de 25% des consommations des bâtiments de l'époque, $2\,\mathrm{cm}$ de laine de verre pouvaient suffire. De même, pour satisfaire la réglementation thermique de 1982 ([RT1, b]), il suffisait de rajouter encore $2\,\mathrm{cm}$ de laine de verre. On voit cependant que plus les exigences augmentent, plus la satisfaction de ces exigences est coûteuse en isolant. En effet, les critères de besoin maximal donné par la RT 2000 ([RT2, a]) nécessitent par exemple $12\,\mathrm{cm}$ de laine de verre dans les murs. On constate également que l'isolation de l'enveloppe n'est pas suffisante pour satisfaire la réglementa-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

tion actuelle, la RT 2005 ([RT2, b]), qui nécessite également de remplacer les simples-vitrages par des doubles-vitrages, et d'avoir recours à une ventilation double-flux qui récupère en partie la chaleur de l'air extrait.

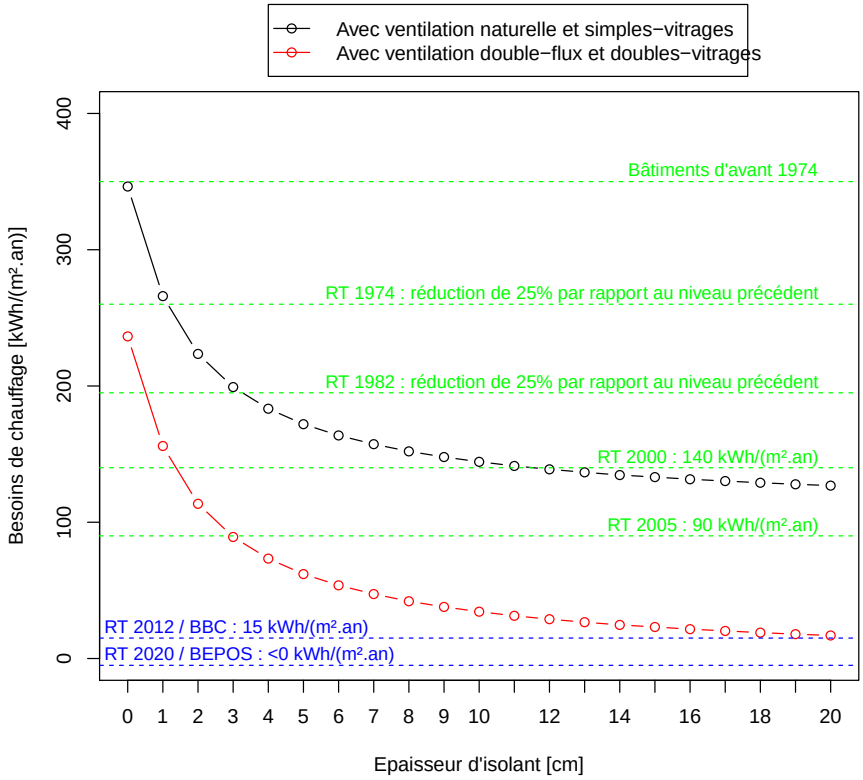

FIGURE 1.7 – Évolution des besoins de chauffage d'une maison individuelle dans le climat de Trappes en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité égale à $0.034\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$)

Mais la nouvelle réglementation thermique, la RT 2012 ([RT2, c]), entrant en application pour la plupart des nouveaux bâtiments au 1er janvier 2013, préconise des niveaux de consommations bien plus contraignants, qui semblent difficilement atteignables simplement en réduisant le plus possible les pertes énergétiques, notamment à travers l'enveloppe. Il est à noter que les valeurs données sur la figure 1.7 sont exprimées en énergie primaire, qui pénalise le recours au chauffage électrique : le niveau des consommations maximales des dernières réglementations thermiques doit alors être réduit d'un facteur égal à 2.58. En outre, les réglementations à venir qui visent des bâtiments à énergie positive, dont les gains seraient supérieurs aux pertes, devront nécessairement prendre en compte la récupération des apports de l'environnement comme une composante du bilan énergétique des bâtiments.

Ainsi, l'isolation, qui permet de réduire efficacement les besoins énergétiques des bâtiments non isolés, comme ce fut le cas lors de la première réglementation thermique de 1974, n'apporte pas une réelle amélioration de la performance énergétique des bâtiments déjà isolés. Or les réglementations thermiques fixent des objectifs de plus en plus contraignants en matière de limitation de la consommation énergétique des bâtiments. Pour satisfaire ces critères, il semble que l'approche d'une conception des bâtiments relevant simplement de la limitation des pertes ne soit pas suffisante. Une nouvelle approche à la fois technologique, mais également méthodologique, de prise en compte des apports énergétiques de l'environnement semble nécessaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3.2 Perspectives

De nombreuses voies de recherche autour de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments sont en cours d'exploration. Elles se divisent en deux grandes thématiques : une thématique de recherche concernant les équipements énergétiques des bâtiments, et une thématique plus concentrée sur les problématiques d'enveloppe. La recherche sur les équipements se préoccupe principalement d'améliorer les rendements des systèmes de chauffage et de climatisation afin de diminuer leur facture énergétique primaire.

En ce qui concerne l'enveloppe, de nombreuses recherches concernent le développement de solutions d'isolation alternatives à l'isolation classique. Il s'agit notamment de mettre au point des matériaux et solutions d'enveloppe ayant un fort pouvoir isolant pour une faible épaisseur : les super-isolants. Parmi ces solutions on peut notamment citer les isolants sous vide, qui permettent d'atteindre des conductivités thermiques de l'ordre de $5\,\mathrm{W/(m{\cdot}K)}$. Ce type d'isolation est notamment prisée en rénovation urbaine où la contrainte d'espace est très forte. Cependant, la question de la durabilité des performances de ces matériaux limite encore leur utilisation.

Les immenses progrès effectués depuis les années 1980 en matière de simulation dynamique du comportement énergétique des bâtiments permettent d'espérer un nouvel essor des démarches de conception bioclimatique. La simulation dynamique permet en effet de simuler l'environnement autour du bâtiment et d'évaluer ainsi son influence sur le comportement énergétique du bâtiment. Grâce à cette méthode il est ainsi possible de beaucoup mieux prendre en compte les apports dans le bilan de l'enveloppe du bâtiment et d'évaluer l'impact de solutions d'enveloppe bioclimatique. Cette voie de recherche pourrait alors donner naissance à des solutions d'enveloppe complémentaires des solutions d'isolation actuelles.

Dans cette optique, cette thèse propose une méthodologie pouvant servir de base à une nouvelle approche de la conception des bâtiments.Elle est principalement basée sur la simulation, et permet d'évaluer la qualité énergétique de l'environnement d'un bâtiment et de mesurer la performance bioclimatique de ce bâtiment.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Chapitre 2

Ressources de l'environnement et technologies bioclimatiques

La démarche bioclimatique présentée au Chapitre 1 est basée sur l'observation et la compréhension de l'environnement des bâtiments. En effet, pour tirer parti des ressources énergétiques de l'environnement il est tout d'abord nécessaire de bien les connaître et de pouvoir décrire leurs caractéristiques physiques. C'est ainsi que l'on peut alors déterminer si une ressource de l'environnement se comporte plutôt comme une source ou un puits de chaleur pour le bâtiment. Trois grandes ressources vont êtes décrites dans cette partie : le rayonnement solaire, la voûte céleste et l'air extérieur. Pour chaque ressource, on expliquera les caractéristiques et l'état des connaissances les concernant. Dans une seconde partie seront présentées les technologies d'enveloppe utilisant chacune de ces ressources que ce soit dans le but de les exploiter en période de besoin, ou au contraire de s'en protéger à d'autres moments.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1 Description des ressources énergétiques de l'environnement

L'environnement qui entoure le bâtiment d'un point de vue énergétique peut être décrit par ce qu'on appelle le climat. Celui-ci est constitué de multiples données (températures diverses, ensoleillement, nébulosité, direction et vitesse du vent, humidité de l'air...) qui sont rassemblées dans des fichiers météorologiques, utilisés notamment dans les simulations énergétiques des bâtiments. Dans le cadre de cette thèse nous allons nous intéresser à trois composantes de cet environnement :

- Le rayonnement solaire,
- La voûte céleste,
- L'air extérieur.

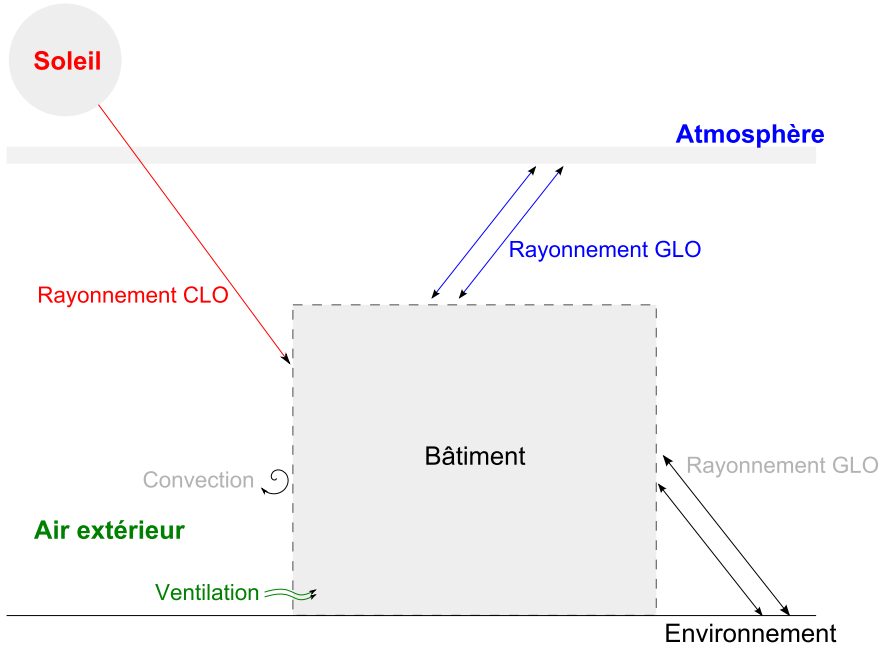

FIGURE 2.1 – Schéma des interactions énergétiques entre un bâtiment et son environnement

2.1.1 Introduction : généralités sur les transferts radiatifs

Une grande partie des échanges énergétiques entre un bâtiment et son environnement s'effectue par transfert radiatif : les surfaces et objets environnant le bâtiment émettent un rayonnement qui peut être transmis, absorbé et réémis, ou réfléchi par l'enveloppe du bâtiment. La caractérisation de la distribution spectrale et de l'intensité de ce rayonnement dépend principalement des caractéristiques optiques de la surface émettrice, et de sa température. Un corps dont le spectre d'émission ne dépend théoriquement que de sa température est appelé corps noir et des lois permettent de décrire ce spectre. Ainsi, la loi de Planck (équation 2.1) nous donne l'intensité du rayonnement émis pour chaque longueur d'onde λ par un corps noir à une température T donnée :

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \tag{2.1}$$

Avec $h = 6.63\,10^{34}\mathrm{J{\cdot}s}$ la constante de Planck, $c = 3\,10^{8}\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$, la célérité de la lumière dans le vide, et $k = 1.38\,10^{-23}\mathrm{J{\cdot}K^{-1}}$ la constante de Boltzmann.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

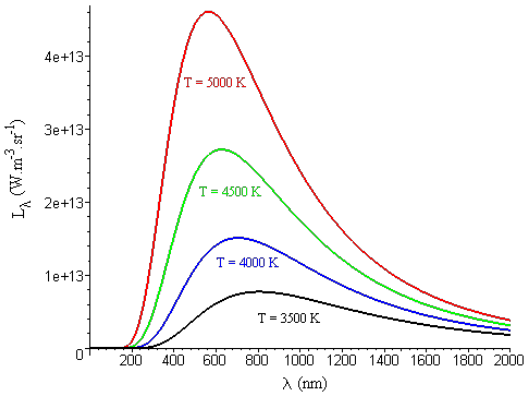

FIGURE 2.2 – Intensité spectrale du rayonnement de corps noirs à des températures différentes (loi de Planck)

Suivant cette loi, l'intensité spectrale d'un corps noir atteint un maximum pour une longueur d'onde donnée (figure 2.2), qui ne dépend que de la température du corps noir. Cette longueur d'onde est calculée à l'aide de la loi de Wien (équation 2.2) qui montre qu'elle est inversement proportionnelle à la température du corps noir émetteur.

$$\lambda_{max} T = 2900\,\mu\mathrm{m}\cdot\mathrm{K} \tag{2.2}$$

En thermique du bâtiment il est courant de distinguer deux types de rayonnement (figure 2.3) :

- Un rayonnement en courtes longueurs d'ondes (CLO : $< 2.5\,\mu\mathrm{m}$) émis par des objets à très haute température (principalement le soleil dont la température de surface est proche de $6000\,\mathrm{K}$). En pratique, ce domaine couvre la totalité du rayonnement solaire.
- Un rayonnement en grandes longueurs d'ondes (GLO : $> 2.5\,\mu\mathrm{m}$) émis par des objets à faible température (le sol, la voûte céleste, les autres bâtiments, la végétation, dont la température est de l'ordre de $300\,\mathrm{K}$). En pratique, dans ce domaine il n'y a plus de rayonnement solaire.

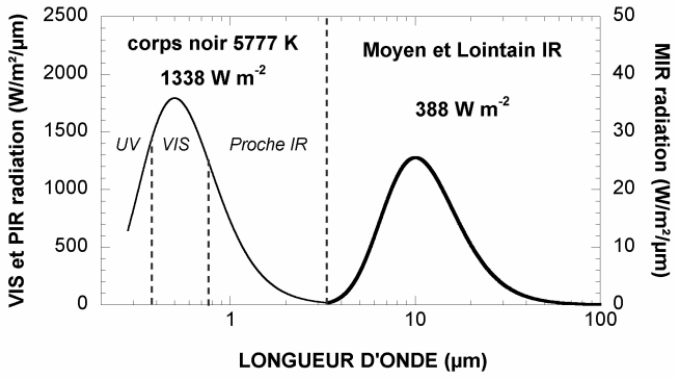

FIGURE 2.3 – Rayonnement solaire idéal extraterrestre tel que reçu en haute atmosphère (trait fin, axe gauche). Rayonnement d'un corps noir à température ambiante (288 K, trait plein, axe de droite). D'après [Clus, 2007]

La puissance totale émise par une surface d'$1\,\mathrm{m}^2$ de corps noir est ensuite calculée grâce à la loi de Stefan-Boltzmann (équation 2.3), obtenue à partir de l'intégration de la loi de Planck sur tout le spectre : elle ne dépend que de sa température.

$$P = \sigma T^4 \tag{2.3}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.2 Le rayonnement solaire

2.1.2.1 Rayonnement solaire extra-terrestre

La source d'énergie la plus connue et la plus importante de l'environnement est le rayonnement solaire. En bonne approximation, le Soleil peut être considéré comme un corps noir dont la surface est à la température apparente de $5800\,\mathrm{K}$. Au centre du Soleil les températures sont beaucoup plus élevées (de l'ordre de quelques millions de Kelvin) du fait des nombreuses réactions thermonucléaires mais les rayonnements qui en résultent sont absorbés par la matière. Si l'on considère le Soleil comme une sphère de rayon égal à $696\,000\,\mathrm{km}$, la puissance du rayonnement solaire est égale à $3.9\,10^{26}\mathrm{W}$. En divisant cette valeur par la surface de la sphère dont le rayon est la distance Soleil-Terre on obtient environ $1380\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$. C'est la constante solaire C qui représente la puissance du rayonnement solaire reçue par une surface d'$1\,\mathrm{m}^2$, située au sommet de l'atmosphère et orientée perpendiculaire aux rayons du Soleil. En réalité, la constante solaire moyenne est égale à $1366.1\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ et varie de 1% suivant l'activité solaire. Pour calculer le flux solaire moyen effectivement reçu par la Terre, on divise la puissance totale du rayonnement incident (soit C multiplié par la surface du disque d'interception des rayons) par la surface de la sphère terrestre. On obtient C/4 soit environ $342\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$.

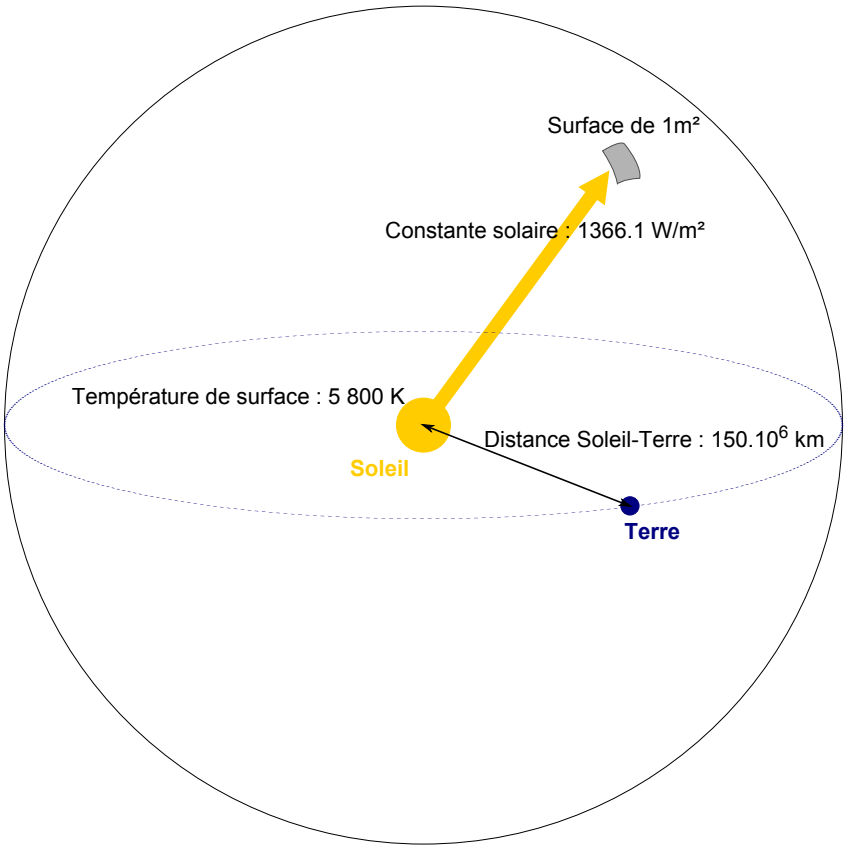

FIGURE 2.4 – Schéma explicatif de la constante solaire

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.2.2 Rôle de l'atmosphère

Le rayonnement solaire reçu à la surface terrestre est inférieur au rayonnement incident au sommet de l'atmosphère. L'atmosphère se comporte en effet comme un milieu semi-transparent qui modifie le rayonnement incident :

- Une partie du rayonnement solaire est réfléchie vers l'espace, ce qui diminue l'intensité du rayonnement effectivement reçu par la surface terrestre.
- Une partie du rayonnement est absorbée par les molécules des gaz atmosphériques, contribuant ainsi au réchauffement de l'atmosphère, mais limitant le flux reçu à la surface terrestre.
- Une partie du rayonnement est diffusée soit par ces mêmes molécules, soit par les aérosols et poussières en suspension dans l'atmosphère.
- Le reste du rayonnement est directement transmis à la surface terrestre sans modification par l'atmosphère.

2.1.2.2.1 Mesure du rayonnement solaire global, diffus et direct

La surface terrestre reçoit donc une combinaison des flux diffusé et directement transmis par l'atmosphère (que l'on appelle flux direct), la somme de ces deux flux étant appelée flux solaire global. Ces trois flux peuvent être mesurés de façon indépendante dans les stations météorologiques et sont ensuite utilisés comme entrées dans les simulations numériques.

Le flux global horizontal Glo_h est le flux solaire total reçu par une surface horizontale. Son intensité peut être mesurée à l'aide d'un pyranomètre (figure 2.5), appareil composé d'un thermopile recouverte d'une surface noire très absorbante et protégée par un ou plusieurs dômes en verre transparent au rayonnement solaire en courtes longueurs d'onde ($< 2.5\,\mu\mathrm{m}$) et opaques au rayonnement atmosphérique en grandes longueurs d'onde. La conception de ces dômes est optimisée pour minimiser les réflexions sur la surface en verre et maximiser ainsi la transmission du flux solaire incident. En absorbant le flux solaire incident, la thermopile s'échauffe et la différence de température entre la surface absorbante et le corps du capteur est convertie en différence de potentiel. En connaissant la sensibilité de l'appareil on en déduit l'intensité du flux solaire global horizontal incident.

FIGURE 2.5 – Pyranomètre du site EDF R&D des Renardières mesurant le flux global horizontal Glo_h

Le flux diffusé horizontal Dif_h est le flux solaire diffusé par l'atmosphère reçu par une surface horizontale d'$1\,\mathrm{m}^2$ parallèle à la surface terrestre. Il peut être mesuré à l'aide d'un pyranomètre muni d'un dispositif occultant le soleil afin de ne pas prendre en compte les rayons solaires directs (figure 2.6).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Il peut s'agir d'un bandeau circulaire fixe qui masque la course du soleil tout au long de la journée, et qui est ajusté périodiquement pour prendre en compte la variation de la hauteur du soleil tout au long de l'année. Il peut également s'agir d'une boule masquant le disque solaire et dont la position varie au cours de la journée. Le pyranomètre à bandeau est moins précis que le pyranomètre à boule puisqu'il occulte également une partie du flux diffusé. Un facteur correctif est donc utilisé pour calculer le flux diffusé horizontal réel.

FIGURE 2.6 – Pyranomètre à boule et à bandeau circulaire du site EDF R&D des Renardières mesurant le flux diffusé horizontal Dif_h

Le flux direct normal Dir_n est le flux solaire direct incident sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil. Il est mesuré à l'aide d'un pyrhéliomètre (figure 2.7) qui fonctionne également à l'aide d'une thermopile, mais le flux solaire incident sur la thermopile provient exclusivement du rayonnement directement transmis par l'atmosphère. En effet, la thermopile est insérée au creux d'un tube qui « pointe » à tout moment en direction du soleil. Le dispositif masque ainsi tout le rayonnement diffusé par l'atmosphère.

FIGURE 2.7 – Pyrhéliomètre du site EDF R&D des Renardières mesurant le flux direct normal Dir_n

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les relations liant les différents flux mesurés sont les suivantes :

$$Glo_h = Dif_h + Dirh \tag{2.4}$$

$$Dir_h = Dir_n \cos(\theta_z) \tag{2.5}$$

avec $\cos(\theta_z)$ la hauteur du soleil, θ_z étant l'angle d'incidence entre la direction du rayonnement direct et la verticale du lieu considéré. Ainsi, pour une même station météorologique, on peut disposer d'un jeu de données expérimentales en excès qui permet de vérifier la cohérence des différentes mesures.

2.1.2.2.2 Spectre solaire

Au sommet de l'atmosphère, le spectre solaire est proche du spectre d'émission d'un corps noir à $5800\,\mathrm{K}$, entre $0.2\,\mu\mathrm{m}$ et $2.5\,\mu\mathrm{m}$ (figure 2.8). La composition spectrale du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère peut être connue soit par mesure à très haute altitude, soit par simulation. Dans [Gueymard, 2004], 23 spectres issus de mesures et de modèles sont comparés à travers une décomposition en 9 bandes spectrales. la comparaison aboutit aux conclusions générales suivantes : le rayonnement solaire est principalement constitué de proches infra-rouges (52%) et de lumière visible (40%), les rayons ultra-violets ne représentant que 8% environ de l'intensité totale du rayonnement. En traversant l'atmosphère, ce rayonnement est absorbé dans les très courtes longueurs d'onde (rayons UV, de longueur d'onde inférieure à $0.4\,\mu\mathrm{m}$) par l'ozone, dans le visible par l'oxygène, l'ozone et la vapeur d'eau, et dans le proche infra-rouge (entre $0.8\,\mu\mathrm{m}$ et $2.5\,\mu\mathrm{m}$) par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone. L'allure du spectre solaire incident à la surface terrestre est donc légèrement modifiée, notamment dans le domaine infra-rouge (figure 2.8). Ainsi, une fois l'atmosphère traversée, l'intensité du rayonnement solaire est nulle au delà de $2.5\,\mu\mathrm{m}$.

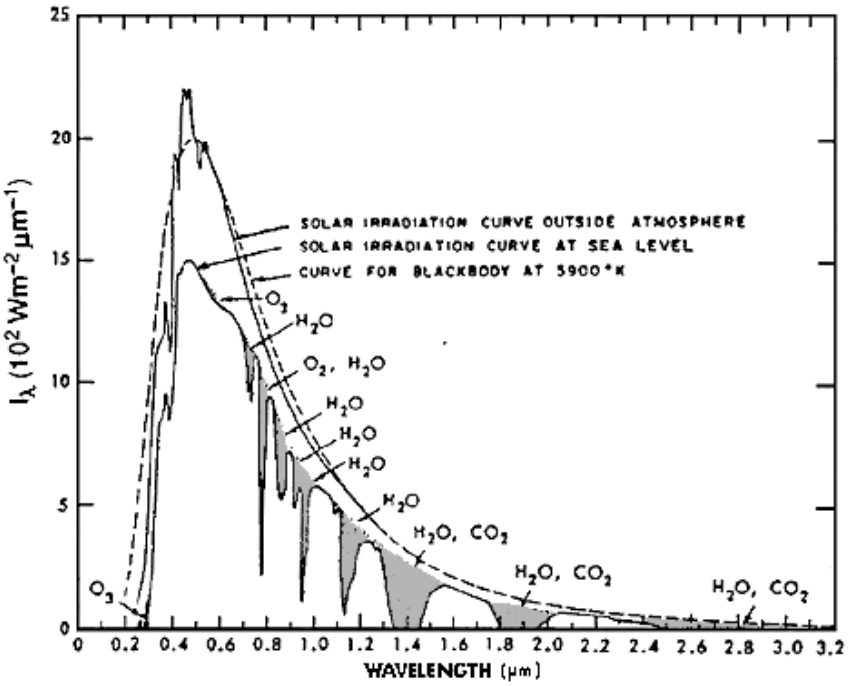

FIGURE 2.8 – Spectre solaire au sommet de l'atmosphère (par comparaison au spectre d'émission d'un corps noir à $5900\,\mathrm{K}$), et à la surface terrestre

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les flux direct et diffusé n'ont pas tout à fait la même distribution spectrale. Cette dernière peut être déterminée à l'aide de mesures par bandes spectrales (comme la base de données du National Renewable Energy Laboratory, figure 2.9) ou grâce à des modèles de rayonnement (modèles du type SPCTRAL2 ([Bird, 1984]) ou SMARTS ([Gueymard, 2001])). Les résultats issus des modèles de rayonnement par ciel clair permettent de montrer que si l'allure générale des spectres diffusé et direct est la même, on observe cependant une différence au niveau du maximum d'intensité qui se situe autour de $0.4\,\mu\mathrm{m}$ pour le spectre du rayonnement diffusé et $0.6\,\mu\mathrm{m}$ pour celui du rayonnement direct. Il est également intéressant de noter qu'au-delà de $0.8\,\mu\mathrm{m}$ le flux diffusé devient négligeable. On constate que le moment de l'année ou de la journée n'a pas d'impact significatif sur la répartition spectrale des deux types de rayonnement. De même, la couverture nuageuse n'a d'influence réelle que sur l'amplitude des spectres, mais pas sur leur forme.

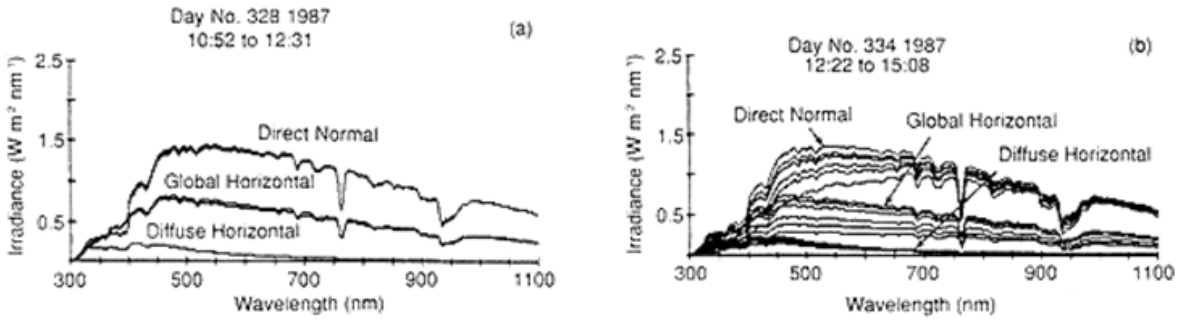

FIGURE 2.9 – Comparaison de spectres solaires diffus et direct (base de données du NREL)

2.1.2.3 Rayonnement solaire incident sur une surface

Le flux solaire incident sur un objet à la surface terrestre est la combinaison de trois composantes :

- le flux direct transmis par l'atmosphère,
- le flux diffusé par l'atmosphère,
- le flux global transmis par l'atmosphère et réfléchi (de manière diffuse et isotrope) par les objets environnants (le sol, la végétation...).

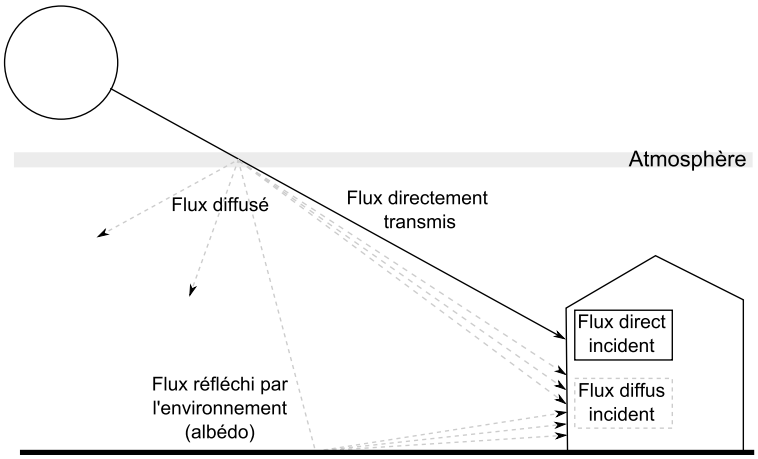

FIGURE 2.10 – Flux directs et diffus au niveau de l'atmosphère et de la paroi

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

On appelle « flux direct incident sur une surface » le flux directement transmis au travers de l'atmosphère reçu par la surface de manière non isotrope, et on appelle « flux diffus incident sur une paroi » la somme du flux solaire diffusé par l'atmosphère et du flux global transmis par l'atmosphère et réfléchi (de manière diffuse et isotrope) par l'environnement (figure 2.10).

2.1.2.3.1 Rayonnement direct incident sur une surface

Le flux direct Dir incident sur une surface est calculé à partir du flux direct horizontal Dir_h obtenu par différence des flux global et diffusé, ou à partir du flux direct normal mesuré. Il dépend (figure 2.11) :

- de l'angle θ_i : angle d'incidence du rayonnement sur la surface mesuré comme l'angle entre la direction des rayons incidents et la normale à la surface,
- de l'angle θ_z : angle entre la direction des rayons incidents et la verticale du lieu considéré (appelé Zénith). La mesure de cet angle permet de calculer la hauteur du soleil $\cos\theta_z$.

Ces deux grandeurs dépendent à la fois de la position de la surface, et de celle du soleil.

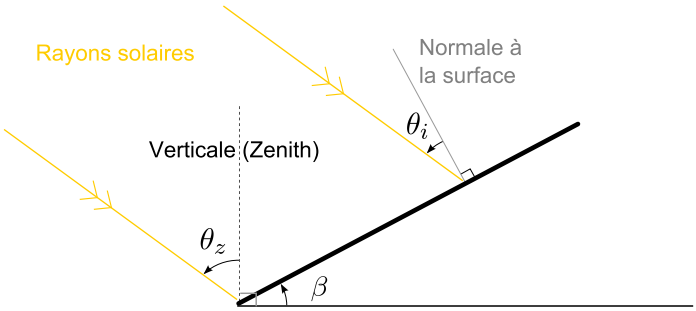

FIGURE 2.11 – Incidence du rayonnement solaire direct sur une surface inclinée

Le flux direct incident sur une surface s'écrit alors :

$$Dir = \cos\theta_i Dir_n = \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_z} Dir_h \tag{2.6}$$

La position de la surface est caractérisée par sa latitude, son angle d'inclinaison (β sur la figure 2.11) par rapport à l'horizontale et son orientation. L'orientation d'une surface est décrite par son « azimut » : c'est l'angle entre la direction du Sud et la projection sur un plan horizontal de la normale à la paroi. La position du soleil, et donc l'incidence des rayons sur la surface dépend du moment de l'année et de la journée. Les formules donnant les valeurs de θ_i et θ_z à partir de tous ces paramètres sont couramment utilisées en simulation numérique et sont par exemple explicitées dans [Cardonnel, 1983].

2.1.2.3.2 Rayonnement diffus incident sur une surface

Comme on l'a vu, le rayonnement diffus Dif incident sur une surface est la somme de deux contributions : la diffusion par l'atmosphère du rayonnement solaire, et la réflexion par l'environnement du rayonnement globalement transmis par l'atmosphère. La capacité de l'environnement à réfléchir le rayonnement solaire est appelée albédo, noté Alb, et s'exprime comme le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement incident. L'albédo d'une surface est donc un nombre sans dimension compris entre 0 et 1 : il est faible pour des matières absorbantes telles que l'asphalte (albédo compris entre 0.04 et 0.12)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

et élevé pour les matières réfléchissantes telles que la neige (albédo pouvant atteindre 0.9). La capacité de l'environnement à réfléchir le rayonnement solaire incident dépend donc non seulement du type de surfaces qui le composent (végétales, urbaines...), mais peut également varier au cours de l'année. Une fois la valeur des rayonnements diffus et global horizontaux connue, il n'est pas nécessaire de connaître la position du soleil ou l'orientation de la surface pour déterminer le rayonnement diffus incident sur cette surface. En effet, ce rayonnement étant isotrope, sa valeur ne dépend que de la portion de ciel et d'environnement « vue » par la surface, et donc de son angle d'inclinaison β sur l'horizontale. En effet une surface horizontale face au ciel ne voit que le rayonnement diffus provenant de la voûte céleste (principe du pyranomètre) tandis que toute autre surface reçoit une combinaison des rayonnements diffus du ciel et de l'environnement. Selon l'angle d'inclinaison β, le rayonnement diffus incident sur une paroi est donc calculé de la manière suivante :

$$Dif = \frac{1+\cos(\beta)}{2} Dif_h + \frac{1-\cos(\beta)}{2} AlbGlo_h \tag{2.7}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.3 La voûte céleste

L'absorption par les gaz atmosphériques des rayonnements solaire et terrestre contribue à maintenir l'atmosphère à une température proche de la température terrestre. L'atmosphère émet donc un rayonnement en grandes longueurs d'onde (centré autour de $10\,\mu\mathrm{m}$) dont une partie est dirigée vers la surface terrestre. Il est possible de mesurer l'intensité de ce rayonnement ou de connaître sa distribution spectrale à l'aide de logiciels basés sur des modèles de transfert radiatif entre les différentes couches de l'atmosphère. D'autres modèles empiriques ou semi-empiriques considèrent l'atmosphère comme une surface fictive, la « voûte céleste », à laquelle on attribue une température apparente de rayonnement et une émissivité apparente.

2.1.3.1 Flux radiatif atmosphérique

Les molécules de gaz présentes dans l'atmosphère (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, ozone, oxygène et méthane) absorbent une partie du rayonnement solaire en courtes longueurs d'onde (principalement l'oxygène, l'ozone et la vapeur d'eau) ainsi qu'une partie du rayonnement solaire et terrestre en grandes longueurs d'onde (principalement le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau). L'atmosphère peut être représentée comme un empilement de couches horizontales au sein duquel des transferts radiatifs s'effectuent d'une couche à l'autre. La connaissance de la composition gazeuse de chaque couche permet donc de déterminer le spectre d'émission de l'atmosphère et il existe des logiciels tels que MODTRAN5 ([Berk *et al.*, 2006]) ou libRadtran ([Mayer et Kylling, 2005]) basés sur ce principe. L'utilisateur peut utiliser une atmosphère standard, ou renseigner lui-même les caractéristiques de chaque couche et ainsi obtenir l'émittance totale et monochromatique (ou du moins par bandes spectrales étroites) du ciel considéré.

L'intensité du flux rayonné par l'atmosphère peut également être mesurée à l'aide d'un pyrgéomètre. Un pyrgéomètre est un instrument composé d'une thermopile protégée par un filtre transparent au rayonnement infra-rouge lointain mais opaque au rayonnement solaire en courtes longueur d'ondes. La tension délivrée par la thermopile est proportionnelle à la différence entre le flux radiatif incident à mesurer et celui émis par sa surface. La connaissance des caractéristiques radiatives (température et émissivité) du pyrgéomètre permet alors d'atteindre la valeur du flux provenant de la voûte céleste.

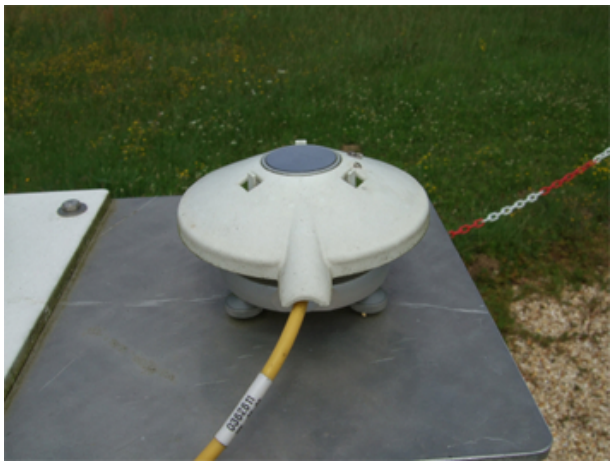

FIGURE 2.12 – Pyrgéomètre du site EDF R&D des Renardières

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.3.2 Température de ciel

Il peut être pratique, d'un point de vue calculatoire, de représenter l'atmosphère comme un corps noir qui émettrait le flux mesuré. On lui attribue alors une température apparente de rayonnement T_c, appelée température de ciel. C'est le concept de voûte céleste qui permet notamment de simplifier les calculs de rayonnement entre le ciel et l'enveloppe du bâtiment. L'émittance totale de la voûte céleste s'écrit donc :

$$E_c = \sigma T_c^4 \tag{2.8}$$

2.1.3.2.1 Expression en fonction de la température sèche de l'air

D'après Bliss ([Bliss, 1961] cité dans [Tang *et al.*, 2004]), le rayonnement atmosphérique reçu par la surface terrestre provient à 90% de la couche atmosphérique située en deçà d'$1\,\mathrm{km}$ d'altitude et à 40% de la couche située en deçà de $10\,\mathrm{m}$. Ainsi, il est possible de lier la température de ciel à des grandeurs calculées au niveau du sol, telle que la température sèche de l'air T_a ou la pression partielle de vapeur d'eau P_{vap}. Les premières formulations de la température de ciel ne dépendent que de la température sèche de l'air T_a, l'hypothèse la plus simplificatrice étant d'estimer comme Dreyfus (cité par Adelard dans [Adelard *et al.*, 1998]) que :

$$T_c = T_a \tag{2.9}$$

Cette simplification est utilisée dans certains logiciels mais elle ne permet pas de bien représenter les échanges radiatifs avec la voûte céleste, particulièrement dans des conditions de ciel nocturne très clair en milieu tempéré où la température de ciel est alors largement surestimée ([Boyer *et al.*, 1998]). Une autre approche est basée sur la prise en compte de la diminution de la température de l'air en fonction de l'altitude. On estime en effet qu'en moyenne la température de l'air décroît d'environ 1°C tous les $100\,\mathrm{m}$ ([Clus, 2007]). La température du ciel peut alors s'écrire :

$$T_c = T_a - \Delta T \tag{2.10}$$

ΔT étant considérée comme une constante pour certains (Boyer et Garde cités dans [Clus, 2007]) ou comme une fonction de la pression partielle de vapeur d'eau P_{vap} pour d'autres ([Perrin de Brichambaut et Vauge, 1982]).

Des formules empiriques établissant une corrélation entre la température de ciel et la température de l'air sont également proposées par Swinbank ([Swinbank, 1964], équation 2.11) et Daguenet ([Daguenet, 1985], équation 2.12) :

$$T_c = 0.0552 T_a^{\frac{3}{2}} \tag{2.11}$$

$$T_c^4 = T_a^4 (1 - 0.261 \exp(-7.77 \times 10^{-4})(T_a - 273)^2) \tag{2.12}$$

Toutes ces formules ont l'avantage de fournir une valeur de la température de ciel T_c uniquement à partir de la température sèche de l'air T_a qui est une donnée météorologique très répandue. Elles ont cependant l'inconvénient de ne pas tenir compte de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, qui joue un rôle très important sur le rayonnement céleste.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.3.2.2 Expression en fonction de la pression partielle de vapeur d'eau

Afin de tenir compte de l'influence de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère sur le rayonnement atmosphérique, la température de ciel T_c peut également être calculée à partir de la pression partielle de vapeur d'eau P_{vap} mesurée à la surface terrestre. Des formules empiriques existent et Aubinet ([Aubinet, 1994]) en propose deux, élaborées à partir de mesures dans des conditions de ciel clair à Gembloux en Belgique (climat tempéré) :

$$T_c = 256 + 0.0164 P_{vap} \tag{2.13}$$

$$T_c = 147 + 18.2 \ln(P_{vap}) \tag{2.14}$$

De la même manière que pour les formules utilisant la température de l'air, les formules précédentes présentent l'avantage de ne requérir la connaissance que d'un seul paramètre, la pression partielle de vapeur d'eau. Dans les deux cas, la température de ciel ainsi calculée ne tient pas compte directement de la couverture nuageuse.

2.1.3.2.3 Rôle de la couverture nuageuse

La présence de nuages, formés en grande partie de goutelettes d'eau, tend à augmenter le caractère émissif du ciel. La température apparente de rayonnement d'un ciel nuageux sera donc plus élevée que celle d'un ciel complètement dégagé, et les formules précédentes ont donc tendance à sous-estimer cette température. Des formulations utilisant le degré de couverture nuageuse du ciel existent.

Aubinet ([Aubinet, 1994]) introduit par exemple l'indice de clarté K_t compris entre 0 et 1 (pour un ciel clair) et propose les trois formules suivantes selon les données météorologiques disponibles :

$$T_c = 154 + 17.7 \ln(P_{vap}) - 9.93 K_t \tag{2.15}$$

$$T_c = -29 - 19.9 K_t + 1.09 T_a \tag{2.16}$$

$$T_c = 94 + 12.6 \ln(P_{vap}) - 13 K_t + 0.341 T_a \tag{2.17}$$

La dernière formulation, liant la température de ciel à la température de l'air, à la pression partielle de vapeur d'eau et à l'indice de clarté, est la plus précise et a permis d'atteindre une corrélation égale à 0.958 avec des données mesurées à Gembloux en Belgique ([Aubinet, 1994]).

D'autres formules permettent de calculer la température de ciel dans des conditions nuageuses en utilisant cette fois la nébulosité N_e, mesurée en octats (0 pour un ciel clair et 8 pour un ciel couvert). La nébulosité peut être déterminée simplement par observation visuelle ou par analyse photographique du ciel. Elle peut également être obtenue en journée à partir du rapport entre les flux solaires diffus et global horizontaux ([Kasten et Czeplak, 1980]) et la nuit à partir d'une valeur moyennée sur la fin de journée précédente.

Clarke (cité dans [Clus, 2007]) calcule ainsi la température de ciel en fonction de la température

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

sèche de l'air et de la nébulosité :

$$T_c = 9.4 \times 10^{-6}(1 - \frac{N_e}{8})T_a^6 + T_a^4 \frac{N_e}{8}(1 - 0.84\frac{N_e}{8})$$
$$(0.527 + 0.84\frac{N_e}{8} + 0.161\exp(8.45(1 - \frac{273}{T_a})))^{\frac{1}{4}} \quad (2.18)$$

2.1.3.2.4 Distinction des températures diurne et nocturne

Les formules précédentes permettent de calculer la température diurne ou nocturne sans distinction. Pour une plus grande précision, Roulet (cité dans [Adelard *et al.*, 1998]) propose une formulation valable seulement pendant la journée à partir des deux variables précédentes (température de l'air et pression partielle de vapeur d'eau) et de la nébulosité :

$$T_c = (\frac{a_1(1 + 0.01b_1) + \frac{c_1(8-N_e)}{8}}{\sigma})^{\frac{1}{4}} \quad (2.19)$$

avec a_1, b_1, et c_1 dépendants de la température extérieure et de la pression partielle de vapeur d'eau.

Des formules donnant la température de ciel nocturne (à partir de l'émissivité du ciel) sont présentées dans la suite.

2.1.3.3 Emissivité apparente de la voûte céleste

Une autre approche tend à considérer la voûte céleste comme un corps gris à faible altitude à la température de l'air extérieur, et auquel on attribue une émissivité apparente ε_c ([Martin et Berdahl, 1984]). L'émittance totale du ciel s'écrit alors :

$$E_c = \varepsilon_c \sigma T_a^4 \quad (2.20)$$

Le calcul de l'émissivité apparente ε_c se décompose en deux étapes : dans un premier temps on calcule l'émissivité ε_0 d'un ciel clair, et dans un second temps on lui applique un facteur correctif qui permet de tenir compte de la présence de nuages dans le ciel.

2.1.3.3.1 Calcul de l'émissivité d'un ciel clair ε_0

Des corrélations permettent de prendre en compte l'influence de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air sur l'émissivité apparente de la voûte céleste par ciel clair ε_0 soit à partir de la pression partielle de vapeur d'eau P_{vap}, soit à partir de la température de rosée T_r.

Expression à partir de la pression partielle de vapeur d'eau Des études établissent ainsi une corrélation entre l'émissivité apparente d'un ciel clair et la pression partielle de vapeur d'eau ([Kondratyev, 1969], [Centeno, 1982] et [Daguenet, 1985]). Les formules sont essentiellement valables la nuit et sont toutes de la forme :

$$\varepsilon_0 = a + bP_{vap}^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

avec a et b obtenus par identification avec le flux mesuré et dépendants du lieu considéré. Daguenet en propose une liste dans [Daguenet, 1985] (voir figure 2.13). On constate que même pour des mesures

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

effectuées dans des lieux très proches (Perpignan et Montpellier, ou en Californie par exemple) les coefficients obtenus sont différents et, dans certains cas, deux couples (a, b) sont proposés pour un même lieu.

Situation	Position	Altitude (m)	a	b
Benson	32°N. 1°W		0,53	0,065
Upsala	60°N. 18°E	200	0,43	0,082
Bassour	37°N. 3°E	1160	0,48	0,058
Montpellier	43° 35'N 3° 53'E	28,59	0,60	0,042
Lindenberg	47°N. 9°E	40	0,34	0,110
Poona	19°N. 74°E	564	0,55;0,62	0,038;0,029
Washington D.C.	39°N. 77°W	137	0,44	0,061
Mt. Weather	37°N. 78°W	540	0,52	0,066
Mt. Whitney	36°N. 118°W	4420	0,50	0,032
Kanzelhöhe	47°N. 14°E	1500	0,47	0,063
Kew	52°N. 0°W	5	0,62	0,056
Lake Hefner	36°N. 98°W	363	0,34;0,62	0,029;0,082
California	37°N. 120°W		0,66	0,039
Perpignan	42°41'N. 2°53'E	25	0,56	0,08

FIGURE 2.13 – Valeurs des paramètres a et b dans l'expression de l'émissivité apparente ε_0 du ciel par temps clair en fonction de la pression partielle de vapeur d'eau P_{vap} pour différents lieux ([Daguenet, 1985])

Expression à partir de la température de rosée L'émissivité apparente d'un ciel clair peut également être calculée en fonction de la température de rosée à partir de la formule suivante :

$$\varepsilon_0 = a_2 + b_2(T_r - 273) \tag{2.22}$$

Les coefficients a_2 et b_2 sont obtenus par identification avec des données mesurées principalement aux Etats-Unis ([Bliss, 1961], Clark et Allen cité dans [Pandey *et al.*, 1995] et [Berdahl et Fromberg, 1982]) et en France à Carpentras ([Berger *et al.*, 1984]) et les résultats sont listés dans le tableau 2.1.3.3.1. Afin d'obtenir une plus grande corrélation entre les valeurs calculées et mesurées, certaines études préconisent de calculer séparément l'émissivité apparente du ciel diurne et nocturne ([Berdahl et Fromberg, 1982] et [Berger *et al.*, 1984]).

Modèle	a_2	b_2
Bliss [Bliss, 1961]	0.8004	0.00396
Clark et Allen (cité dans [Pandey *et al.*, 1995])	0.787	0.0028
Berdahl et Fromberg [Berdahl et Fromberg, 1982]	0.741 0.727	0.0062 la nuit 0.006 le jour
Berger [Berger *et al.*, 1984]	0.752 0.77	0.0048 la nuit 0.0038 le jour

TABLE 2.1 – Valeurs des paramètres a_2 et b_2 dans l'expression de l'émissivité apparente ε_0 du ciel par temps clair en fonction de la température de rosée T_r

Comme dans le cas des formules donnant l'émissivité apparente d'un ciel clair en fonction de la pression partielle de vapeur d'eau, on constate que les coefficients obtenus par identification diffèrent d'une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

étude à l'autre, suivant la station météorologique considérée. Martin et Berdahl ([Martin et Berdahl, 1984]), proposent donc une autre formulation de l'émissivité apparente d'un ciel clair à partir de la température de rosée :

$$\varepsilon_0 = 0.711 + 5.6 \times 10^{-3}(T_r - 273) + 7.3 \times 10^{-5}(T_r - 273)^2 \tag{2.23}$$

Cette corrélation a été établie à partir de 50000 points de mesures effectuées dans six villes réparties sur tout le territoire des Etats-Unis. D'après Martin et Berdahl, elle permet donc d'obtenir de manière fiable l'émissivité par ciel clair quel que soit le lieu considéré. Pour cette raison, elle est fréquemment utilisée dans les logiciels de simulation thermique du bâtiment.

2.1.3.3.2 Prise en compte de l'émissivité des nuages

Les formules précédentes permettent seulement de calculer l'émissivité apparente d'un ciel clair ε_0. Pour obtenir l'émissivité apparente de la voûte céleste quelles que soient les conditions nuageuses un facteur correctif est proposé par Martin et Berdahl ([Martin et Berdahl, 1984]) :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + (\frac{N_e}{8}\varepsilon_n\Gamma)(1 - \varepsilon_0) \tag{2.24}$$

avec ε_n l'émissivité des nuages et Γ un coefficient dépendant de la température de base des nuages. Ces deux grandeurs peuvent être difficilement mesurées, mais des corrélations en fonction de la hauteur des nuages sont possibles. Le produit $\varepsilon_n\Gamma$ sera donc proche de 1 pour des nuages à basse altitude très émissifs et proche de 0 pour des nuages à haute altitude (cirrus) peu émissifs ([Daguenet, 1985] et [Martin et Berdahl, 1984]).

2.1.3.4 Comparaison des formules

Il existe donc un grand nombre de formules permettant de caractériser le rayonnement de la voûte céleste, soit en considérant l'atmosphère comme un corps noir auquel on attribue une température de ciel T_c, soit en attribuant une émissivité apparente ε_c à l'atmosphère alors considérée comme un corps gris à la température de l'air extérieur T_a. On peut retrouver T_c à partir de ε_c en utilisant la formulation suivante ([Martin et Berdahl, 1984]) obtenue à partir des formules 2.8 et 2.20 :

$$T_c = \varepsilon_c^{\frac{1}{4}} T_a \tag{2.25}$$

Pandey ([Pandey *et al.*, 1995]) compare les températures de ciel obtenues à partir des différentes formules donnant l'émissivité par ciel clair en fonction de la température de rosée et on constate des écarts de l'ordre de 10°C entre les températures de ciel annuelles ainsi obtenues.

De la même manière nous avons comparé les températures de ciel obtenues à partir de neuf formules utilisant la température de l'air ou la température de rosée à Trappes. Les résultats sont présentés sur la figure 2.14 et plusieurs constats peuvent être tirés de son observation. En premier lieu, toutes les formules donnent une température de ciel inférieure à la température de l'air et une surface à la température de l'air extérieur émettra donc plus d'énergie vers la voûte céleste qu'elle n'en reçoit de cette dernière : le ciel se comportera plutôt comme un puits d'énergie. En outre la figure indique que l'écart entre les températures obtenues à partir des différentes formules peut atteindre 20°C. On est donc loin de l'unanimité sur le sujet

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

et des progrès sont nécessaires dans ce domaine si des applications basées sur l'exploitation de la voûte céleste doivent connaître un véritable développement.

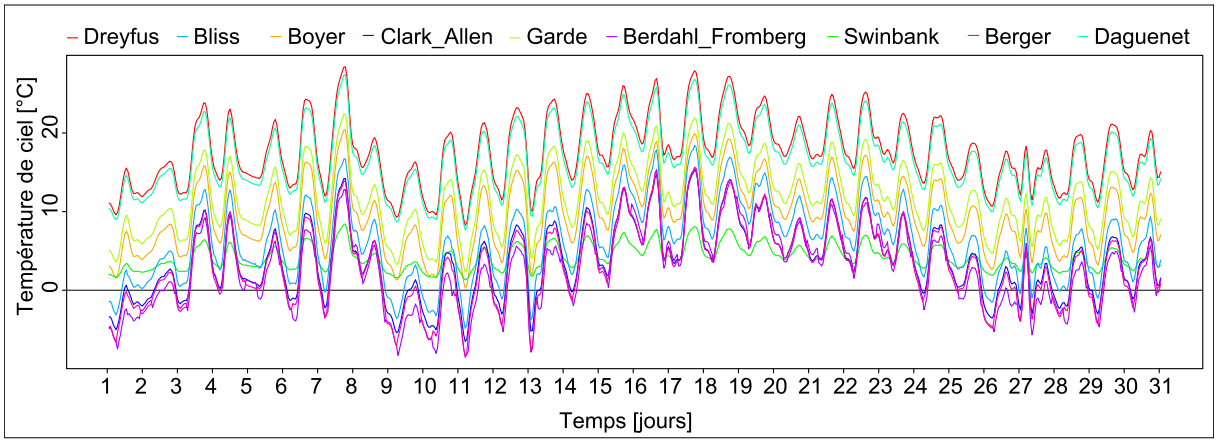

FIGURE 2.14 – Comparaison de différentes formules donnant la température de ciel clair à Trappes pour le mois de juillet

Sur la figure 2.15 on compare la température de ciel obtenue à partir de la formule de Martin et Berdahl (la plus utilisée) pour un ciel clair et un ciel couvert. On remarque que la température obtenue à partir de l'émissivité d'un ciel clair est toujours inférieure à la température obtenue avec la prise en compte de la nébulosité et que les deux formules donnent bien des résultats similaires en cas de nébulosité nulle (jours 3, 6, 7, 11 et 13 par exemple).

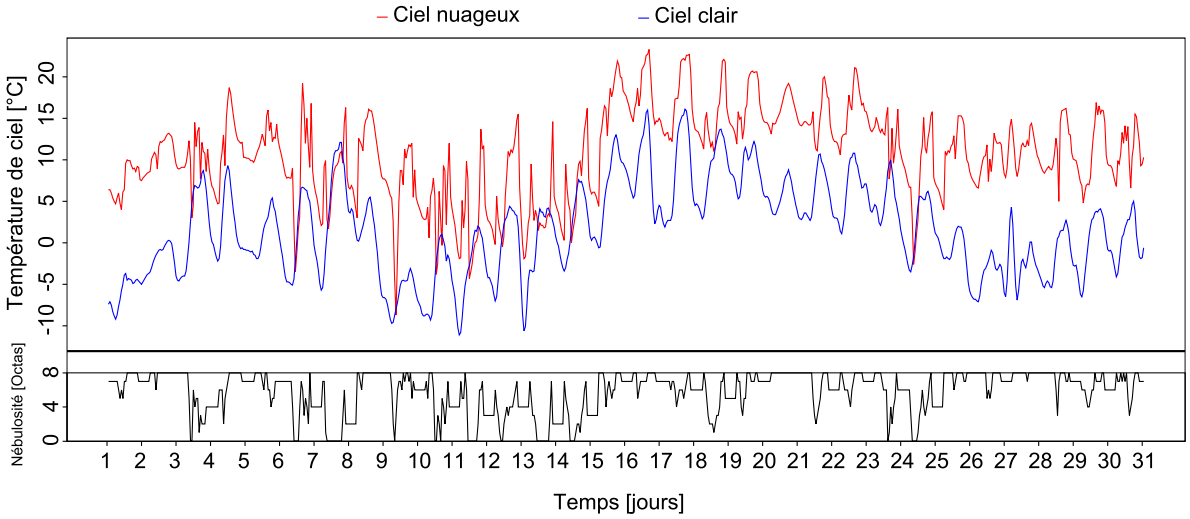

FIGURE 2.15 – Comparaison des températures de ciel obtenues à partir de la formule de Martin et Berdahl ([Martin et Berdahl, 1984]) pour un ciel clair (équation 2.23) et un ciel nuageux (équation 2.23 et 2.24) à Trappes pour le mois de juillet

Dans la suite de l'étude on utilisera les formules de Martin et Berdahl (équations 2.23 et 2.24) pour calculer l'émissivité apparente de la voûte céleste quelle que soient les conditions nuageuses et obtenir ainsi la température de ciel.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.4 L'air extérieur

2.1.4.1 Influence du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire et l'atmosphère jouent un rôle prépondérant sur la température de la surface terrestre. En effet, grâce à l'effet de serre, la température moyenne de la surface terrestre se situe aux environs de 15°C avec de faibles variations. Sans atmosphère, cette température serait plutôt de l'ordre de -18°C avec des variations de plusieurs centaines de degrés entre le jour et la nuit, comme sur d'autres planètes comme Mars ou Mercure. La température de l'air extérieur en un lieu donné est ainsi très dépendante du flux solaire incident. A cause de la rotation de la Terre autour du soleil (alternance des saisons pour les régions tempérées) et sur elle-même (alternance jour/nuit), le flux solaire, et donc la température de l'air extérieur, varient au cours de l'année et de la journée.

2.1.4.1.1 Variation annuelle

Au niveau de l'équateur, ou le flux solaire incident est relativement constant tout au long de l'année, la moyenne des températures mensuelles est également constante. En revanche dans les régions tempérées l'évolution annuelle de la température peut être représentée par un profil sinusoïdal atteignant son maximum en été et son miminum en hiver (figure 2.16).

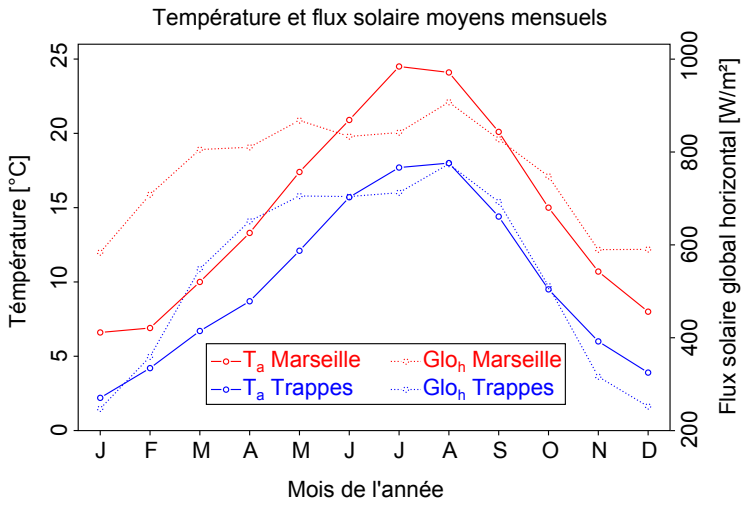

FIGURE 2.16 – Température moyenne et flux solaire moyen à Marseille et Trappes pour chaque mois de l'année

2.1.4.1.2 Variation jour-nuit

De plus l'alternance du jour et de la nuit a également une influence sur la température extérieure qui est plus élevée en présence du rayonnement solaire. Les régions où le degré d'humidité de l'atmosphère est élevé voient cependant cette différence atténuée, ce qui est le cas pour les climats équatoriaux et tropicaux humides. Dans les régions tempérées, cette différence de température entre le jour et la nuit est maximale en été (figure 2.17). L'air extérieur peut alors être considéré comme un véritable puits d'énergie permettant de rafraîchir les bâtiments durant les nuits estivales. On constate cependant que la différence moyenne de température extérieure entre le jour et la nuit qui atteint environ 4°C à Trappes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

reste inférieure à la différence de température entre l'air extérieur et la voûte céleste qui se situe plutôt entre 10 et 20°C.

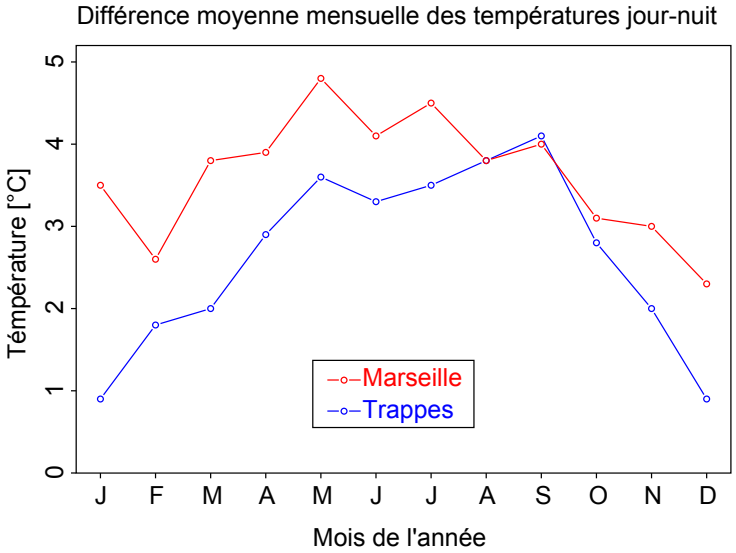

FIGURE 2.17 – Différence des température moyenne diurne et nocturne à Marseille et Trappes pour chaque mois de l'année

2.1.4.2 Îlot de chaleur urbain

Pour un même lieu, il existe également une différence de température entre les zones urbaines denses et les zones rurales environnantes. Ce phénomène est appelé îlot de chaleur urbain (urban heat island en anglais [Oke, 2002]) et résulte de plusieurs facteurs ([Bouyer *et al.*, 2011]), notamment de :

- l'augmentation de l'absorption du rayonnement solaire par les surfaces urbaines sombres (asphalte),
- le piégeage des rayons solaires par multi-réflexion entre les bâtiments,
- l'augmentation de l'effet de serre local à cause de la pollution atmosphérique due aux activités urbaines,
- le stockage de la chaleur dans les édifices,
- la réduction des espaces verts qui par leur ombrage et la photosynthèse limitent l'augmentation des températures urbaines,
- les dégagements de chaleur anthropogéniques.

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain fait l'objet de nombreuses recherches et campagnes de mesure depuis vingt ans, notamment en Europe où un état de l'art est dressé par Santamouris ([Santamouris, 2007]). Les résultats obtenus à partir de la comparaison de dizaines d'études en région méditerranéenne, en Europe centrale et septentrionale sont analysés et mettent en évidence les principales caractéristiques et conditions de la présence d'un îlot de chaleur urbain.

Il apparaît tout d'abord que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain atteint son maximum en période nocturne, et plus particulièrement par ciel clair. En effet, la nuit les surfaces rurales dégagées sont beaucoup mieux rafraîchies par rayonnement avec la voûte céleste que les surfaces urbaines qui « voient » peu le ciel. Par ciel clair, la température de ciel étant plus basse, ce rafraîchissement s'accroît et donc la différence entre les températures urbaine et rurale environnante également. Dans ces conditions, l'îlot de chaleur urbain peut être caractérisé par une température nocturne plus élevée de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

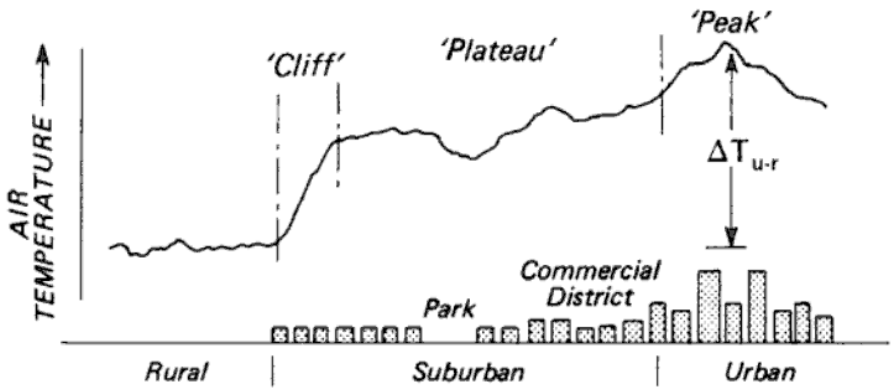

FIGURE 2.18 – Phénomène d'îlot de chaleur urbain d'après [Oke, 2002]

près de 16°C en région méditerranéenne ([Santamouris, 2001]), 9 à 12°C en Europe continentale (Pologne : [Klysik et Fortuniak, 1999] et [Szymanowski, 2005]) et 6°C en Europe du Nord (Göteborg : [Eliasson et Holmer, 1990]).

La morphologie urbaine influence également l'îlot de chaleur urbain, notamment la géométrie des rues caractérisée par le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur des rues ([Bouyer *et al.*, 2011]). Lorsque ce rapport est élevé (rues sont étroites et bordées de hauts bâtiments), les surfaces urbaines voient peu le ciel et l'îlot de chaleur urbain est plus important que dans le cas de larges rues et de bâtiments de faible hauteur. En revanche, l'îlot de chaleur urbain ne semble pas tellement corrélé à la taille de l'aire urbaine ([Santamouris *et al.*, 2010]).

La plupart des études montrent que l'îlot de chaleur urbain est plus important en été qu'en hiver dans toute l'Europe. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'effet du piégeage du rayonnement solaire dans la structure urbaine est plus important en été lorsque l'intensité de ce rayonnement est maximale. Cependant, dans quelques cas particuliers méditerranéens (Lisbonne, Grenade), l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est plus élevée en hiver ([Alcoforado, 2006] et [Montavez *et al.*, 2000]).

Enfin, un autre facteur qui tend à diminuer l'îlot de chaleur urbain est la vitesse du vent : toutes les études montrent que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est maximale pour des vitesses de vent très faibles.

Il est important de noter que les stations météorologiques qui fournissent les données d'entrée des simulations numériques sont la plupart du temps situées en milieu rural. Le potentiel de rafraîchissement de l'air extérieur est ainsi très certainement surévalué pour une application en milieu urbain.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2 Technologies bioclimatiques

Chacune des trois ressources décrites dans la partie précédente, (le rayonnement solaire, le ciel et l'air) peut être utilisée pour réduire les besoins énergétiques des bâtiments. L'enveloppe du bâtiment, qui fait le lien entre l'intérieur et l'extérieur, est ainsi un vecteur d'échanges privilégié : on parle alors d'enveloppe bioclimatique. Le rayonnement solaire est étudié depuis très longtemps et la plupart des technologies bioclimatiques développées depuis le milieu du vingtième siècle cherchent à exploiter ce potentiel. La voûte céleste, bien que connue depuis longtemps, n'a pas été autant utilisée et la plupart des technologies exploitant ce potentiel en sont restées au stade expérimental. Enfin l'air extérieur, qui représente l'environnement immédiat d'un bâtiment, peut être utilisé grâce à la ventilation, facilement contrôlable par les occupants.

2.2.1 Exploitation du rayonnement solaire

Le soleil est certainement la ressource la plus convoitée dans l'approche bioclimatique. Ainsi, de nombreuses technologies d'enveloppe sont conçues pour utiliser au mieux le rayonnement solaire que ce soit par les parois transparentes (fenêtres) ou par les parois opaques (murs). L'utilisation du rayonnement solaire peut se faire par apports directs, mais également via le préchauffage de l'air de ventilation ou le réchauffement des parois pour créer une zone tampon. En outre certains composants d'enveloppe sont conçus pour protéger du rayonnement solaire afin d'éviter les surchauffes en période chaude.

2.2.1.1 Traitement du rayonnement solaire incident sur une surface

Le flux solaire incident sur l'enveloppe d'un bâtiment est en partie réfléchi, en partie absorbé et en partie transmis selon ses coefficients de réflexion ρ, d'absorption α et de transmission τ, avec $\rho+\alpha+\tau = 1$. Une paroi opaque au rayonnement solaire sera donc définie par un coefficient de transmission nul. Les trois coefficients sont dépendants à la fois de la longueur d'onde, mais également de l'angle d'incidence du rayonnement sur la paroi. Ces deux propriétés sont très utiles pour mettre au point des parois sélectives qui permettent d'affiner le comportement de l'enveloppe des bâtiments vis-à-vis du rayonnement solaire.

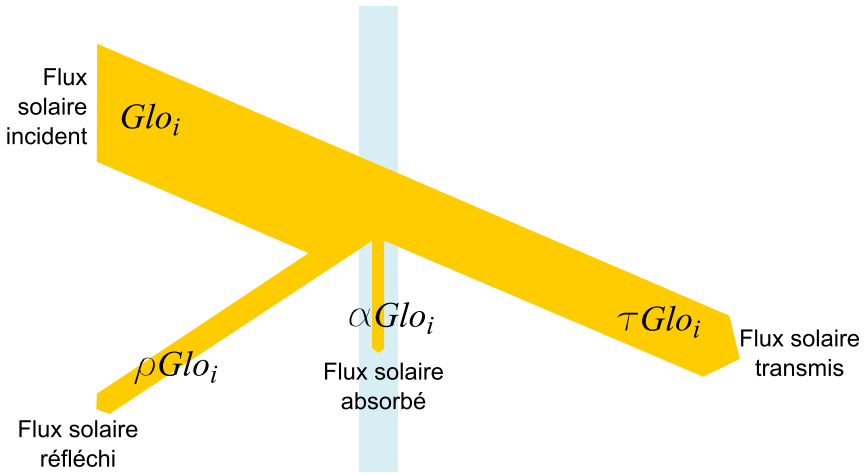

FIGURE 2.19 – Traitement du flux solaire incident sur une surface en fonction des coefficients de transmission τ, de réflexion ρ et d'absorption α

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Dépendance spéculaire La transmission du rayonnement solaire incident sur une surface dépend en théorie de la longueur d'onde de ce rayonnement (figure 2.20). Cette propriété peut être utilisée pour adapter la fonctionnalité de l'enveloppe aux besoins énergétiques du bâtiment (éclairage, chauffage, rafraîchissement). Par exemple, une paroi transmettant bien le rayonnement visible mais pas le rayonnement infra-rouge permet d'éclairer l'intérieur d'un bâtiment sans apports thermiques superflus. Cependant, dans les simulations classiques de bâtiments, on considère souvent des coefficients radiatifs intégrés sur tout le spectre solaire car les fichiers météorologiques utilisés en entrée ne permettent pas en général de distinguer plusieurs bandes spectrales. Seule la distinction entre les courtes et les grandes longueurs d'ondes est faite.

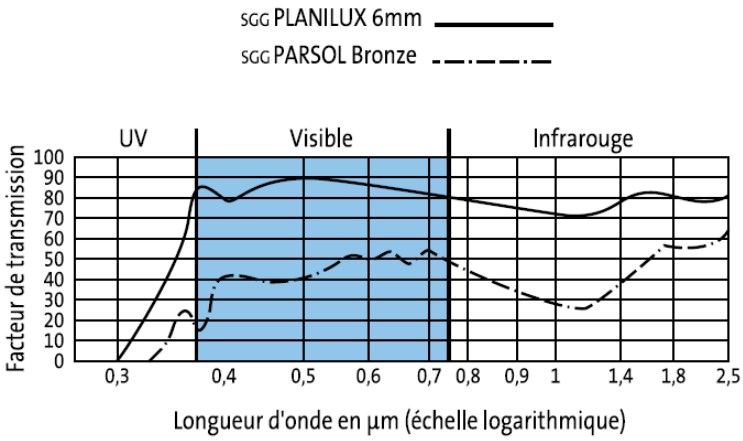

FIGURE 2.20 – Spectres de transmission de deux vitrages de Saint-Gobain (d'après [Saint-Gobain, 2007])

Dépendance angulaire La dépendance des coefficients radiatifs à l'angle d'incidence du rayonnement solaire conduit à considérer différemment le flux diffus isotrope et le flux direct. En effet, on ne définit pas de direction privilégiée pour le rayonnement diffus incident sur une paroi. Les coefficients ρ_{Dif}, α_{Dif} et τ_{Dif} sont donc constants. En revanche, le rayonnement direct étant caractérisé entre autres par l'angle d'incidence θ_i, les valeurs de ρ_{Dir}, α_{Dir} et τ_{Dir} dépendent de cet angle. Ainsi, plus l'angle d'incidence avec la surface est élevé (rayon rasant) moins il est transmis par cette surface. Pour une application dans le bâtiment cela signifie que des fenêtres verticales transmettent moins bien le rayonnement direct en été qu'en hiver car le soleil est plus « haut » dans le ciel en été qu'en hiver.

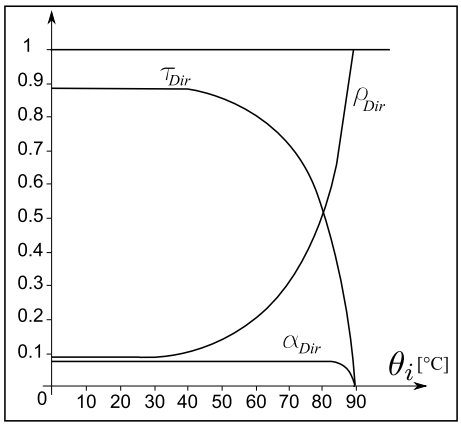

FIGURE 2.21 – Variation des coefficients radiatifs d'un vitrage ordinaire en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement direct (d'après [Cardonnel, 1983])

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2.1.2 Captation du rayonnement solaire par les vitrages

L'utilisation directe du rayonnement solaire incident sur l'enveloppe du bâtiment s'effectue principalement par le biais de vitrages. Le verre plat utilisé pour la fabrication des vitrages est un matériau semi-transparent au rayonnement en courtes longueurs d'onde (<$2.5\,\mu\mathrm{m}$), surtout dans le domaine visible (entre 0.4 et $0.8\,\mu\mathrm{m}$) et le proche infra-rouge (entre 0.8 et $2.5\,\mu\mathrm{m}$) qui sont les principales composantes du rayonnement solaire. Les vitrages remplissent ainsi une double fonction, éclairer et chauffer l'intérieur du bâtiment.

2.2.1.2.1 Facteur solaire g

L'aptitude d'un vitrage à utiliser le rayonnement solaire est caractérisée par son facteur solaire g. Ce paramètre prend en compte non seulement le flux directement transmis par le vitrage, mais également le flux solaire absorbé et réémis en grandes longueurs d'onde vers l'intérieur du bâtiment. Le facteur solaire g permet de prendre en compte ces deux phénomènes, transmission et absorption, en étant défini comme le rapport de la somme des flux transmis et émis vers l'intérieur par le vitrage sur le flux solaire incident lorsque les températures intérieure et extérieure sont considérées égales.

$$g = \frac{\tau Glo_i + \Phi_{emis}}{Glo_i} \tag{2.26}$$

2.2.1.2.2 Coefficient de transmission thermique U_g

Un autre aspect à prendre en compte dans le choix d'un vitrage est son coefficient de transmission thermique U_g qui caractérise la manière dont le vitrage transmet la chaleur d'une face à l'autre. Il s'exprime comme l'inverse de la résistance totale du vitrage (conduction au travers et convection-rayonnement de chaque côté) en $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}}$:

$$U_g = \frac{1}{R_e + R_c + R_i} \tag{2.27}$$

avec R_c résistance de conduction du vitrage, R_i et R_e résistance surfaciques (convection et rayonnement) des faces intérieures et extérieures respectivement.

La conductivité thermique d'un vitrage étant relativement élevée (de l'ordre de $1\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$) et le vitrage étant mince, la principale contribution au coefficient de transmission thermique d'un vitrage est la conduction au travers de la lame de verre. Pour limiter ce flux on a recours au double voire au triple vitrage, où l'espace entre les lames de verre est rempli avec de l'air ou un autre gaz faiblement conductif comme de l'argon. Une autre technique consiste à augmenter la résistance radiative du vitrage en réduisant son émissivité, par dépôt d'un revêtement métallique ou d'oxyde métallique sur sa surface. Selon le mode de dépôt on atteint alors des émissivités pouvant être inférieures à 0.1, alors qu'un verre non traité a plutôt une émissivité variant entre 0.8 et 0.9 ([Etienne, 2009], [Chow *et al.*, 2010]). On parle alors de vitrage à faible (ou basse) émissivité.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2.1.2.3 Compromis entre transmissions solaire et thermique

Le comportement d'un vitrage va être radicalement différent suivant l'intensité du rayonnement solaire incident. En effet, lorsque le flux solaire incident est faible (typiquement en début ou en fin de journée, ou par ciel très couvert) ou nul (la nuit), le flux solaire transmis ne permet pas de compenser les pertes thermiques à travers le vitrage, et particulièrement pour les simples vitrages très conductifs. En revanche lorsque le flux incident est élevé (de l'ordre de plusieurs centaines de $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ en plein jour lorsque le ciel est dégagé), les pertes thermiques à travers le vitrage sont largement compensées par le flux solaire transmis (figure 2.22). Or la réduction du coefficient de transmission thermique, que ce soit par ajout d'une ou plusieurs lames de gaz (et donc de verre) ou par dépôt d'une couche faiblement émissive, entraîne nécessairement une réduction du facteur solaire, a cause des multi-réflexions entre les différentes couches de verre ou d'une baisse de transmission de la couche peu émissive. Toute la question pour choisir un vitrage adapté à la situation climatique est donc de trouver le bon compromis entre pertes thermiques et apports solaires.

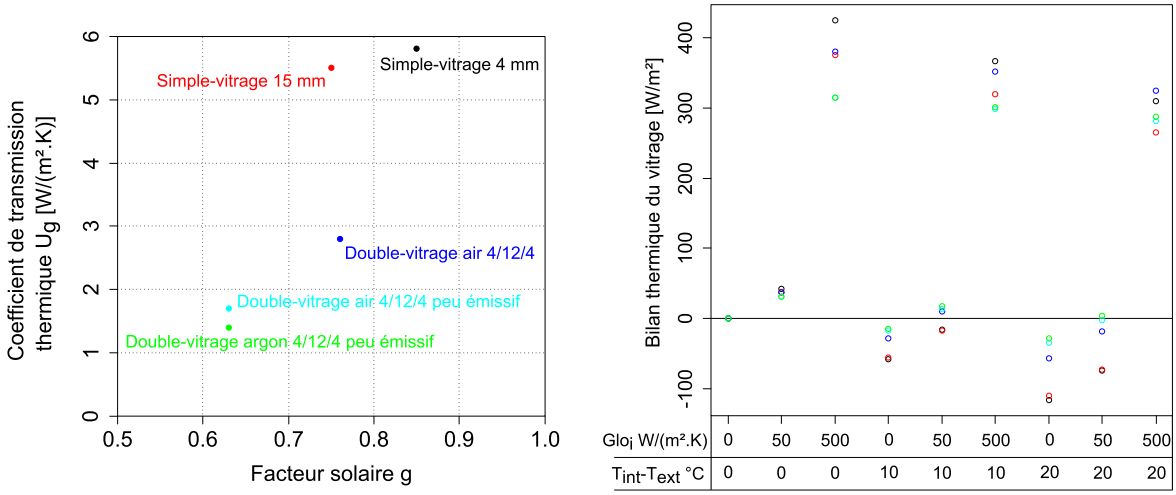

FIGURE 2.22 – Coefficient de transmission thermique U_g et facteur solaire g de cinq vitrages (d'après [Saint-Gobain, 2007]) et bilans thermiques associés pour différentes conditions de température et d'ensoleillement

2.2.1.3 Contrôle de la transmission solaire des vitrages

Selon la période de l'année, le rayonnement solaire n'est pas toujours utile et en été il est souvent créateur de besoins de rafraîchissement. Afin d'éviter la transmission par les parois vitrées à l'intérieur du bâtiment de ce rayonnement indésirable, il est possible d'exploiter la dépendance spéculaire ou angulaire des coefficients radiatifs pour mieux contrôler les apports solaires.

2.2.1.3.1 Vitrages angulairement sélectifs

On a vu que le taux de transmission du rayonnement solaire des vitrages dépendait de la longueur d'onde du rayonnement incident, ce qui permet de produire des vitrages qui ne transmettent que la lumière visible et pas le rayonnement infra-rouge constituant plus de la moitié de l'énergie solaire. Cependant, cette technique présente deux inconvénients. D'une part l'énergie transmise à l'intérieur du bâtiment reste très importante puisque la part visible du rayonnement solaire représente 43% de l'énergie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

totale du spectre. D'autre part, la diminution des apports due à la réflexion du rayonnement infra-rouge augmente les besoins de chauffage en période hivernale. Pour répondre à ces deux problématiques, il est possible d'utiliser les propriétés géométriques du rayonnement solaire afin de ne bloquer que le soleil d'été.

En effet, la hauteur du soleil, et donc l'angle d'incidence des rayons, varie en fonction de la saison, à cause de l'inclinaison de la Terre par rapport au plan de l'écliptique. Cette variation est connue depuis longtemps et des diagrammes solaires (figure 2.23) permettent de connaître la hauteur et l'azimut du soleil pour différents moments de l'année. Ainsi, l'utilisation de casquettes, ou brise-soleil, permet de protéger le bâtiments du rayonnement solaire lorsque le soleil est haut l'été, tout en ne bloquant pas le rayonnement solaire de faible incidence en hiver. L'avantage de l'utilisation de dispositifs qui utilisent les propriétés angulaires du rayonnement solaire est qu'ils bloquent surtout le rayonnement direct : ainsi, une partie du rayonnement diffus, et donc de l'éclairage naturel, parvient quand même à l'intérieur du bâtiment.

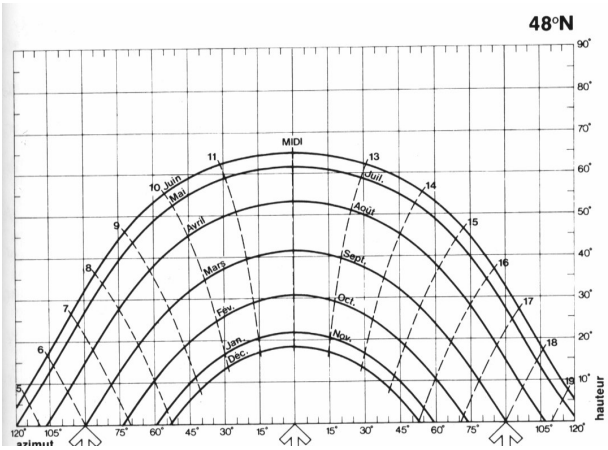

FIGURE 2.23 – Exemple de diagramme solaire (d'après [Mazria, 1979])

Les coefficients radiatifs d'un vitrage dépendent de l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur le vitrage, mais il est possible de modifier ces coefficients grâce à la mise au point de vitrages angulairement sélectifs. Pour cela, il existe deux solutions : soit recouvrir le vitrage d'un film ayant des propriétés angulaires sélectives spécifiques ([Smith *et al.*, 1998]), soit utiliser la structure interne du vitrage pour contrôler la transmission des rayons. Cette seconde approche regroupe plusieurs techniques :

- la création de micro-irrégularités dans le verre à l'aide d'un laser qui jouent le rôle de brise-soleil à l'intérieur même du vitrage ([Reppel et Edmonds, 1998] et [Edmonds, 1993]),
- l'utilisation de micro-prismes permettant de dévier les rayons incidents ([Lorenz, 1998] et [Lorenz, 2001]),
- l'utilisation de panneaux en polycarbonate creux, créant des multi-réflections qui laissent entrer ou bloquent les rayons selon l'angle d'incidence ([Köhl *et al.*, 2005]).

Certaines de ces techniques qui dévient les rayons incidents par des jeux de multi-réflections ne sont alors plus transparentes mais simplement translucides.

2.2.1.3.2 Vitrages adaptatifs

Pour contrôler les apports solaires au travers des vitrages il est possible d'utiliser des verres teintés ou réfléchissants (par sélection spectrale ou angulaire par exemple). Mais les apports solaires varient non seulement au cours de l'année, mais également au cours de la journée, et des propriétés radiatives constantes ne sont pas toujours les mieux adaptées à une utilisation dans le bâtiment. D'autres solutions

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

existent, qui permettent aux vitrages de changer de propriétés radiatives en fonction de stimuli extérieurs : on les appelle alors vitrages chromogènes.

La figure 2.24 représente schématiquement les performances des trois principaux dispositifs chromogènes au regard de la réduction des besoins de rafraîchissement et d'éclairage, et ceci comparé à des verres aux propriétés radiatives constantes. Les dispositifs les plus performants en termes de réduction des besoins de rafraîchissement sont les verres électrochromes et thermochromes même si ces derniers ont une plus faible efficacité en ce qui concerne la réduction des besoins d'éclairage. Les verres photochromes sont les moins performants en termes de réduction des besoins de rafraîchissement, ils apparaissent même comme moins performants que des verres réfléchissants.

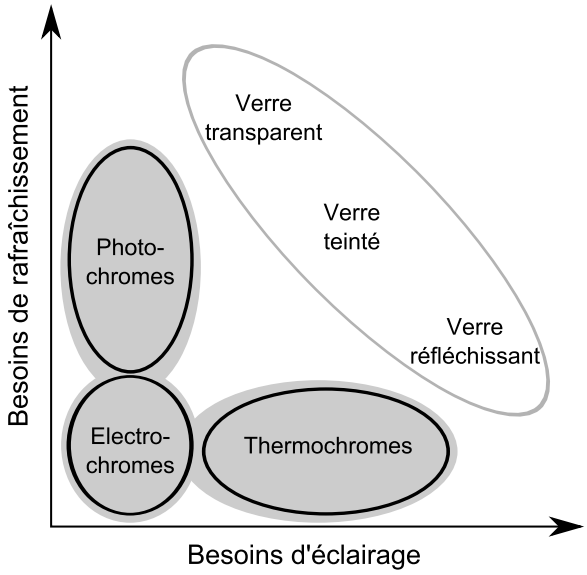

FIGURE 2.24 – Classement de différents types de vitrages en fonction de leur efficacité dans la réduction des besoins de rafraîchissement et d'éclairage (d'après [Granqvist *et al.*, 2010])

Vitrages thermochromes La particularité des verres thermochromes est de changer de propriétés optiques (réflectivité, absorptivité et transmittivité) en fonction de la température, ce qui peut s'avérer très pratique pour des applications énergétiques.

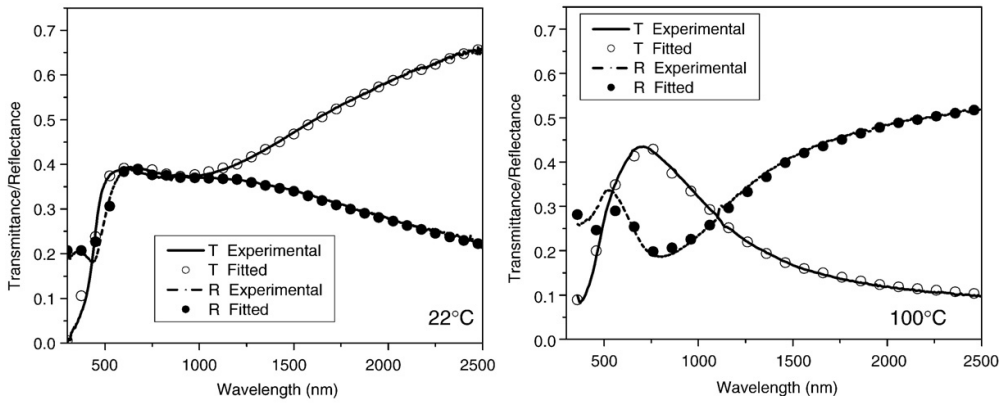

FIGURE 2.25 – Transmittivité et réflectivité spectrale de l'oxyde de vanadium pour deux températures situées de part et d'autre de sa température de transition (d'après [Granqvist *et al.*, 2010]).

Les vitrages thermochromes sont composés d'une paroi en verre sur laquelle est déposée un composé

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

métallique dont le changement de phase entraîne un changement de propriétés optiques. Le composé utilisé le plus couramment est l'oxyde de vanadium, VO2, sous forme semi-conductrice transparente au rayonnement infra-rouge en deçà de 68°C et sous forme métallique réfléchissant le rayonnement infra-rouge au delà (figure 2.25).

Même si c'est le composé métallique dont la température de transition est la plus basse (les autres ayant une température de transition de l'ordre de quelques centaines de degrés celsius), l'oxyde de vanadium n'est pas utilisable en l'état dans des applications liées au bâtiment (où la température ambiante dépasse rarement les 30°C). Il est cependant possible d'abaisser cette température de transition par dopage, notamment au tungstène ou au fluor, ou encore par co-dopage tungstène-fluor (figure 2.26). On constate que la température de transition varie alors entre 0 et 70°C pour les différents dopages et plusieurs solutions sont possibles pour obtenir une température proche de 30°C qui permettrait une utilisation directe en vitrage, par exemple un dopage à 1.8% de tungstène. D'autres techniques permettent également d'abaisser la température de transition de l'oxyde de vanadium, notamment par amincissement de la couche déposée ([Etienne, 2009]).

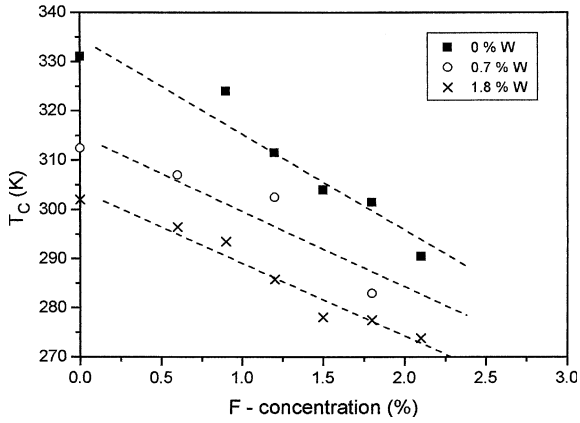

FIGURE 2.26 – Températures de différents films d'oxyde de vanadium dopés au tunsgstène (W) et au fluor (F) (d'après [Burkhardt *et al.*, 2002]).

Vitrages électrochromes Les revêtements électrochromes ont la propriété de changer de caractéristiques optiques de manière réversible lorsqu'un potentiel électrique leur est appliqué. Ils sont généralement constitués d'une couche de base, en verre ou en plastique, recouverte d'un film transparent conducteur sur lequel une couche cathodique électro-active est déposée. Par-dessus est fixée une couche conductrice ainsi qu'une couche de stockage d'ions recouverte d'une couche anodique électro-active. Le tout est enfin recouvert d'un second film transparent. Le principe de ces couches électrochromes est donc de changer de couleur selon la forme, oxydée ou réduite, qu'elles adoptent. Les plus efficaces sont celles qui sont réfléchissantes dans leur état coloré, mais la plupart sont plutôt absorbantes. En combinant plusieurs types dans les différentes couches, il est possible d'optimiser le dispositif. Les matériaux les plus utilisés sont des oxydes métalliques tels que l'oxyde de tungstène, de nickel, d'iridium ou de niobium ([Baetens *et al.*, 2010]), ou des polymères (dont certains ont des temps de réponse très courts). Des combinaison des deux familles sont également possibles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Autres types de vitrages Les vitrages gazochromes fonctionnent sensiblement sur le même principe que les vitrages électrochromes, mais le changement de forme oxydée à réduite s'effectue à l'aide d'hydrogène gazeux à la place de l'application d'un potentiel électrique. Le système est lors plus simple car il ne requiert qu'une seule couche électrochrome.

Des vitrages à cristaux liquides existent également. Cette fois-ci une couche de cristaux liquides est emprisonnée au sein du vitrage entre deux couches conductrices. Lorsqu'un potentiel est appliqué aux couches conductrices, les cristaux s'alignent et laissent passer les rayons solaires alors que dans l'état neutre ils sont désordonnés et provoquent une diminution de la transmittivité du vitrage. Le problème de ce type de dispositif est la consommation d'électricité due à l'application d'un courant continu pour obtenir un vitrage clair, requis la plupart du temps.

2.2.1.3.3 Technologies adaptatives

Le contrôle de la transmission du flux solaire selon la période de l'année peut également être réalisé à l'aide de dispositifs transparents adaptatifs présentant deux modes de fonctionnement : l'un pour l'été et l'autre pour l'hiver, le changement entre les deux pouvant être contrôlé par l'habitant.

Fenêtre réversible C'est le cas notamment de la fenêtre réversible théoriquement présentée par [Feuermann et Novoplansky, 1998] et expérimentalement réalisée et testée par [Etzion et Erell, 2000] et [Erell *et al.*, 2004]. Il s'agit d'une fenêtre double-vitrage au sein de laquelle sont placés deux autres vitrages : un verre clair et un verre teinté, la lame d'air entre les deux étant ventilée sous le mode « rideau d'air », les deux ouvertures étant placées du même côté. En été, le verre teinté est placée à l'extérieur et la lame d'air est en mode rideau d'air extérieur, ce qui tend à rafraîchir le verre clair intérieur. En hiver, c'est le verre clair qui est placé à l'extérieur pour laisser passes les rayons solaires et ainsi réchauffer le rideau d'air intérieur.

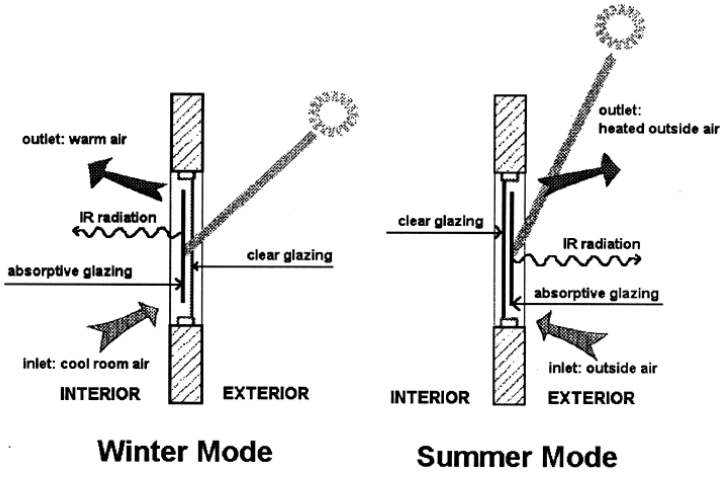

FIGURE 2.27 – Mode de fonctionnement hivernal et estival de la fenêtre réversible de [Etzion et Erell, 2000]

Le verre teinté réduit un peu les gains solaires directs en hiver qui ne représentent alors que 30% de l'énergie transmise à l'intérieur, le reste étant transmis essentiellement pas convection et rayonnement infra-rouge. En hiver, le système augmente ainsi les besoins de chauffage. En été cependant, l'économie sur les besoins de rafraîchissement induite par la réduction des apports solaires permet de compenser

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

la hausse des besoins de chauffage, surtout dans les climats plutôt chauds (du type méditerranéen par exemple).

FIGURE 2.28 – Deux prototypes de la fenêtre réversible de [Erell *et al.*, 2004]

Fenêtre liquide Un autre exemple de fenêtre adaptative est donnée par [Carbonari *et al.*, 2012]. Dans ce cas, le comportement réversible est assuré par la présence ou l'absence d'un liquide absorbant dans le vitrage. Cette nouvelle fenêtre est constituée d'un double-vitrage classique auquel on juxtapose un simple-vitrage, venant ainsi créer une fine lame d'air ($1.5\,\mathrm{mm}$ environ) qui peut se remplir d'un liquide absorbant pour réduire les apports solaires en été. Un réservoir placé sous la fenêtre permet de stocker le liquide l'hiver lorsque les gains solaires sont désirés, et alimente le vitrage à l'aide d'une pompe. Un grand soin doit être apporté à la mise au point du liquide afin que le frottement sur le verre soit presque inexistant lors de la vidange. Le dispositif a été testé pendant une saison estivale et les performances du liquide n'ont pas été altérée permettant ainsi une réduction du facteur solaire par rapport à un double-vitrage standard.

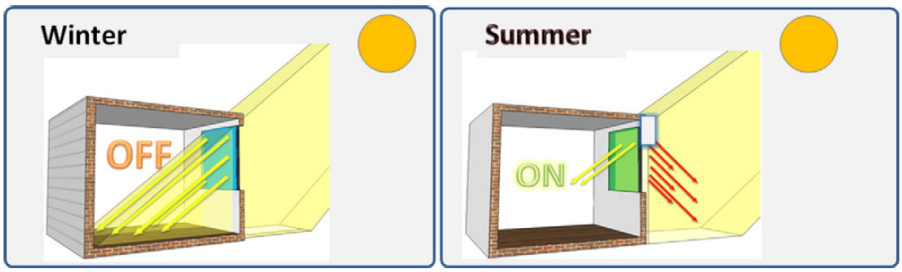

FIGURE 2.29 – Modes de fonctionnement en hiver et en été de la « liquid window » de [Carbonari *et al.*, 2012]

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2.1.4 Utilisation combinée : effet de serre

Le rayonnement solaire peut également être utilisé par des parois transparentes ou opaques pour réchauffer de l'air dans une cavité grâce à l'effet de serre. Cet air peut alors être utilisé pour la ventilation ou simplement contribuer à augmenter la température de la paroi concernée. Ce principe a été utilisé pour la première fois avec le mur Trombe ([Trombe *et al.*, 1976]), et depuis de nombreuses variantes de cette technologie ont été imaginées. Elles peuvent être regroupées sous l'appellation « parois double-peau » puisqu'il s'agit à chaque fois de venir créer une lame d'air contre la paroi originelle. Comme leur nom l'indique, les parois double-peau sont constituées d'une paroi traditionnelle (vitrée ou opaque) à laquelle on superpose une paroi vitrée extérieure, le but étant de profiter de l'effet de serre induit par le réchauffement de l'air entre les deux peaux. Ces parois double-peau peuvent être ventilées ou non, et donc être utilisées pour préchauffer l'air intérieur ou comme zone tampon. Lorsque la lame d'air est ventilée, on parle également de parois hélio-pariéto-dynamiques : utilisation du rayonnement solaire (hélio) pour réchauffer un fluide et induire ainsi une circulation de ce fluide dans la paroi (pariéto) qui peut être utilisé directement pour la ventilation si c'est de l'air propre, ou indirectement comme moyen de chauffage si c'est un autre fluide.

2.2.1.4.1 Typologie des façades double-peau

Le rapport de l'annexe 44 de l'AIE propose une typologie des parois double-peau basée sur le travail du Centre Scientifique et Technique de la Construction belge ([Loncour *et al.*, 2004]) à travers le projet européen « Doubles façades ventilées ». Trois critères sont ainsi pris en compte pour classer ces façades :

- le type de ventilation (mécanique, naturelle ou hybride),
- le mode de circulation d'air,
- le compartimentage de la façade.

Le type de ventilation La ventilation des façades double-peau peut s'effectuer de manière mécanique (à l'aide de ventilateurs), de manière naturelle (en utilisant le tirage thermique et l'effet du vent) ainsi que de manière hybride (en utilisant une combinaison contrôlée des deux modes précédents). La ventilation naturelle est la plus difficile à contrôler car son efficacité dépend des conditions extérieures : direction et vitesse du vent, et ensoleillement. Le tirage thermique (ou effet cheminée) permet à l'air qui s'est échauffé de sortir par le haut de la cavité créant ainsi une circulation verticale. Les façades double-peau étant principalement intégrées sur des immeubles de bureaux, la ventilation naturelle est généralement assistée d'une ventilation mécanique afin de garantir les performances de la façade dans le temps.

Le mode de circulation d'air Les parois double-peau sont constituées de deux peaux souvent parallèles dans lesquelles peuvent être pratiquées des ouvertures en partie haute ou basse, munies de clapets pour adapter le fonctionnement de la paroi double-peau aux besoins du bâtiment. Selon le positionnement des ouvertures sur l'une ou l'autre des peaux, le mode de ventilation ne sera pas le même (figure 2.30) :

1. Lorsque les ouvertures sont pratiquées toutes les deux dans la peau extérieure, un rideau d'air extérieur est créé ce qui tend à rafraîchir la paroi.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2. Si les ouvertures sont pratiquées toutes les deux dans la peau intérieure le rideau d'air est situé à l'intérieur.
3. Lorsque les ouvertures sont situées en partie basse de la peau extérieure et en partie haute de la peau intérieure, on est dans la configuration du mur Trombe et l'air est injecté dans le bâtiment après préchauffage.
4. Lorsque les ouvertures sont situées en partie haute de la peau extérieure et en partie basse de la peau intérieure l'air est extrait du bâtiment.
5. Si les deux peaux sont étanches (pas d'ouverture), il n'y a pas de circulation d'air et la lame d'air est alors utilisée comme couche isolante et on parle de zone tampon.

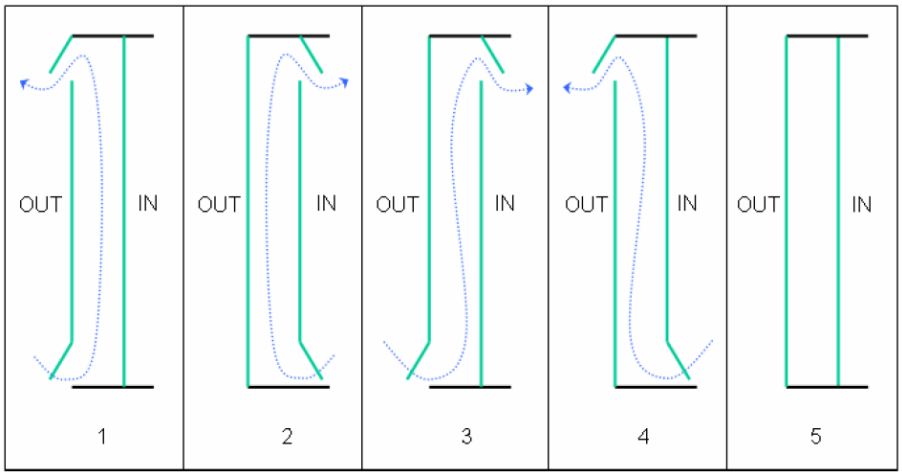

FIGURE 2.30 – Différentes modes de circulation de l'air dans la paroi d'après [Loncour *et al.*, 2004]

Les modes de ventilation listés ci-dessus fonctionnent par convection naturelle dans la lame d'air. Il est cependant possible d'inverser les circulations d'air en utilisant une ventilation mécanique.

Le compartimentage de la façade Les parois double-peau sont souvent intégrées à des bâtiments de grande hauteur. Ces façades peuvent alors être compartimentées de différentes manières, ce qui a une influence sur la circulation de l'air.

- La géométrie de type « boîte » : la double-façade intégrée sur tout le bâtiment est compartimentée horizontalement et verticalement (par étage) et chaque boîte ainsi formée a un comportement indépendant. C'est le mode de fonctionnement qui se rapproche le plus du mur Trombe.
- Sur un même étage, les boîtes peuvent être réunies et on assiste plutôt à un compartimentage de type corridor, où il est même possible de circuler. La lame d'air est alors assez large (de l'ordre d'un mètre et une ventilation mécanique est nécessaire).
- Dans la géométrie de type « boîte », deux compartiments consécutifs peuvent également être séparés par un conduit vertical multi-étages qui récupère l'air extrait des compartiments et l'évacue grâce à un tirage thermique favorisé par la hauteur du conduit.
- Une géométrie multi-étages peut aussi être rencontrée : dans ce cas la lame d'air n'est pas compartimentée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2.1.5 Protection contre le rayonnement solaire : parois végétales

La manière la plus simple de protéger un bâtiment contre le rayonnement solaire est de munir ses parois vitrées, si elles existent, de stores ou de volets. Mais d'une part, cette solution est assez radicale puisqu'elle bloque complètement les apports lumineux et peut donc créer de l'inconfort ou induire une sur-consommation d'énergie pour l'éclairage, et d'autre part, tous les bâtiments ne sont pas munis de parois vitrées (entrepôts, gymnases...) et il faut alors trouver des solutions pour les parois opaques.

La végétation peut être utilisée comme moyen de contrôle des apports solaires sur l'enveloppe des bâtiments, en toiture ou en paroi verticale. En effet, non seulement la couverture végétale protège la paroi concernée des rayons solaires, mais en plus l'énergie absorbée est en grande partie dissipée par évapo-transpiration ou utilisée pour la photosynthèse et non pas restituée sous forme de rayonnement. Les ouvrages bioclimatiques recommandent ainsi de planter des arbres à feuilles caduques devant la façade sud des bâtiments afin de les protéger du soleil en été et de laisser passer les rayons en hiver.

2.2.1.5.1 Toiture végétale

L'une des techniques d'enveloppe consiste à utiliser la couverture végétale en toiture des bâtiments. En effet, il s'agit des surfaces qui sont les plus exposées au soleil et elles sont souvent planes ou peu inclinées, ce qui favorise la mise en oeuvre de toitures végétales. Ces toitures se composent, la plupart du temps, d'une couche de substrat sur laquelle sont plantées diverses espèces végétales. Plusieurs types de couvertures végétales sont possibles, allant du type intensif avec une faible épaisseur de substrat et une végétation restreinte et résistante de type sedum, jusqu'aux couvertures de type extensif où l'épaisseur du substrat est bien plus importante et peut supporter un véritable petit jardin.

FIGURE 2.31 – Exemple de toiture végétale à Göteborg en Suède

De nombreuses études numériques et expérimentales ([Castleton *et al.*, 2010], [Feng *et al.*, 2010], [Niachou *et al.*, 2001], [Cheng *et al.*, 2010], [Jim et Tsang, 2011], [Fioretti *et al.*, 2010]) se sont attachées à décrire les processus énergétiques qui s'opèrent dans ces parois végétales et leurs conséquences sur l'ambiance intérieure des bâtiments ainsi que sur les besoins de rafraîchissement.

Les études montrent que la couverture végétale, par effet d'ombrage, diminue l'énergie solaire incidente sur la paroi tandis que le substrat agit comme une couche isolante. Ces deux phénomènes combinés produisent les effets suivants :

– la température de surface et la température intérieure diminuent, ainsi que l'amplitude de leurs

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

variations,
- la hausse des températures est limitée et décalée,
- les besoins de rafraîchissement diminuent.

Plusieurs paramètres influent sur ces différents effets. On remarque tout d'abord, que l'impact d'une toiture végétale est plus important lorsque la paroi n'était pas préalablement isolée : cette technique est donc recommandée surtout dans le cas de réhabilitation de bâtiments anciens. Le pouvoir isolant du substrat augmente avec son épaisseur, même si une épaisseur de $10\,\mathrm{cm}$ semble être suffisante, mais diminue avec sa teneur en eau. En revanche, la teneur en eau augmente la capacité thermique du substrat ce qui favorise le décalage des effets du soleil. L'effet d'ombrage dépend beaucoup du type de végétation : une végétation verte et dense est plus efficace qu'une végétation rouge et éparse. Un effet non désirable vient cependant réduire les performances des toitures végétales : la couche d'air emprisonnée entre la végétation et le substrat tend à se réchauffer, et le rafraîchissement de la paroi par convection est beaucoup moins efficace. Les phénomènes qui permettent de réduire la température de la couche végétale sont propres au fonctionnement des plantes : l'évapostranspiration est responsable de plus de 60% de la chaleur évacuée, les pertes radiatives représentent 30% et la photosynthèse utilise environ 10% de l'énergie accumulée.

En revanche l'efficacité des toitures végétales, notamment leur pouvoir isolant, n'est pas prouvée en hiver, et les études, qu'elles soient expérimentales ou numériques, ne sont pas toutes d'accord sur ce point, même s'il semblerait que les impacts soient plutôt positifs quelle que soit la saison lorsque la toiture n'était pas isolée à l'origine. Dans ce cas, même un faible niveau d'isolation apportée par le substrat provoque un effet significatif.

Mis à part ces impacts sur les besoins énergétiques et le confort des bâtiments, les toitures végétales ont d'autres avantages sensibles à l'échelle du quartier ou de la ville. Elles permettent ainsi de réduire l'effet de l'îlot de chaleur urbain, filtrer la pollution atmosphérique, produire de l'oxygène en ville, atténuer les grands volumes d'eau de pluie, et restaurer la biodiversité en ville.

Murs végétalisés La végétalisation de l'enveloppe du bâtiment peut également s'effectuer à l'aide d'une structure porteuse, de type treillis, sur laquelle viennent s'enrouler des plantes ou directement à même les murs grâce à des plantes grimpantes de type lierre ou vigne. Dans ce cas, le pouvoir isolant de la couverture végétale est uniquement dû à la couche d'air entre la paroi et les feuilles, et non pas par un quelconque substrat. Si la végétation est caduque, la paroi est ombragée en été, mais pas l'hiver lorsque les feuilles sont tombées. Peu d'études existent sur l'impact de telles techniques sur les besoins thermiques des bâtiments. Cependant, des mesures ont été réalisées sur des bâtiments dont les façades étaient recouvertes de lierre ([Sternberg *et al.*, 2011]), et les résultats en matières d'amortissement des amplitudes de température de surface du mur sont à peu près similaires à ceux obtenus avec les toitures végétales.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2.2 Utilisation du rayonnement vers la voûte céleste

2.2.2.1 Flux radiatif émis par une surface vers le ciel

L'enveloppe d'un bâtiment échange de l'énergie par rayonnement en grandes longueurs d'onde avec la voûte céleste. Le flux énergétique net reçu par l'enveloppe s'écrit comme la différence entre le flux radiatif reçu et le flux radiatif émis vers le ciel. Pour une paroi inclinée (angle β avec l'horizontale) le flux net reçu par la paroi s'écrit :

$$\Phi = \frac{1+\cos(\beta)}{2}(\sigma T_c^4 - \varepsilon_p \sigma T_p^4) \tag{2.28}$$

En considérant une différence de température $|T_c - T_p| < 40$°C, cette expression peut être linéarisée de la manière suivante :

$$\Phi = 2\sigma\varepsilon_p(1+\cos(\beta))(\frac{T_c+T_p}{2})^3(T_c - T_p) \tag{2.29}$$

Le signe du bilan radiatif de la paroi dépend donc du signe de $T_c - T_p$. Or on a vu que la température de ciel était toujours inférieure à la température de l'air extérieur, quel que soit le modèle utilisé. Comme la température de surface de l'enveloppe d'un bâtiment est proche de la température de l'air extérieur, voire supérieure notamment à cause de l'absorption du rayonnement solaire, le bilan radiatif entre l'enveloppe du bâtiment et le ciel est négatif : l'enveloppe « perd » de l'énergie par rayonnement vers la voûte céleste. La paroi d'un bâtiment la mieux indiquée pour maximiser les échanges avec la voûte céleste est celle qui « voit » le mieux le ciel, c'est à dire la toiture. C'est la raison pour laquelle les quelques technologies qui utilisent le ciel comme puits de chaleur sont disposées en toiture.

2.2.2.2 Rafraîchissement nocturne

Pendant la nuit, en l'absence de rayonnement solaire incident, seul le bilan radiatif en grandes longueurs d'onde est pris en compte et la surface terrestre perd effectivement de l'énergie et se refroidit. C'est ce qui explique notamment le phénomène de rosée qui résulte de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique au niveau du sol. La perte énergétique par unité de surface est proportionnelle à l'émissivité de la surface considérée.

Les premiers systèmes utilisant les échanges radiatifs nocturne vers la voûte céleste sont les « skytherms » d'Harold Hay : des bidons d'eau placés en toiture qui se rafraîchissent durant la nuit et restituent cette fraîcheur durant la journée, tout en étant protégés du rayonnement solaire par des panneaux isolants amovibles. D'autres dispositifs de type radiateur céleste permettent de diminuer la température de l'air de ventilation en deçà de la température extérieure : ce système convient donc à des climats où l'écart entre la température diurne et nocturne reste assez faible. Il peut être simplement constitué d'une plaque de métal (bon conducteur) sous lequel on fait passer l'air de ventilation. Comme le métal n'est pas un matériau très émissif il faut au préalable le revêtir d'une couche plus émissive ([Givoni, 1994]).

2.2.2.3 Rafraîchissement diurne

Pendant la journée, cette perte d'énergie est compensée par l'absorption du flux solaire incident. En effet, pour une différence de température de 10 à 20°C entre l'enveloppe du bâtiment et le ciel, le flux

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

perdu vers le ciel par unité de surface est de l'ordre de 50 à $100\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, valeur largement inférieure au flux solaire incident qui peut atteindre jusqu'à $1000\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ par ciel clair l'été. Ainsi, pour utiliser la voûte céleste comme puits d'énergie pendant la journée, l'enveloppe d'un bâtiment doit non seulement présenter une émissivité (en grandes longueurs d'onde : GLO) importante pour augmenter les pertes radiatives vers le ciel, mais également présenter un taux de réflexion du rayonnement solaire (en courtes longueurs d'onde : CLO) maximal pour éviter les gains indésirables. C'est dans cette optique que sont expérimentés des revêtements réflecteurs (cool coatings en anglais) présentés au paragraphe suivant.

2.2.2.3.1 Revêtements réflecteurs

Des revêtements réflecteurs caractérisés par une réflectivité en courtes longueurs d'onde très haute (et donc une basse absorptivité) peuvent être utilisés, particulièrement en toiture (« cool roofs » en anglais), pour limiter les besoins de rafraîchissement dans les bâtiment ainsi que l'effet de l'îlot de chaleur urbain. Ces matériaux possèdent également une forte émissivité en grandes longueurs d'onde pour mieux évacuer le rayonnement vers la voûte céleste. Il s'agit typiquement de matériaux clairs présentés sous forme de films polyethylene à faible densité (LDPE) d'épaisseur $0.2\,\mathrm{mm}$ ou de peinture liquide ([Muselli, 2010]).

FIGURE 2.32 – Exemple de toit recouvert d'une peinture réflective (source : [Bozonnet *et al.*, 2011])

Des travaux expérimentaux et numériques ont étudié l'influence de l'utilisation des ces matériaux en toiture dans plusieurs climats et les résultats montrent que la réduction des besoins de rafraîchissement est proportionnelle à l'augmentation de la réflectivité en courtes longueurs d'onde ([Synnefa *et al.*, 2007]) (figure 2.33). L'efficacité de ces matériaux est plus importante dans les climats où la majorité des besoins sont des besoins de rafraîchissement, mais elle est encore raisonnable pour des climats où les besoins sont également partagés entre chauffage et rafraîchissement. De plus les revêtements réflecteurs sont plus efficaces pour des bâtiments non isolés que pour des bâtiments isolés ([Synnefa *et al.*, 2007], [Bozonnet *et al.*, 2011]) et ils sont plus efficaces lorsque les températures extérieures sont moins élevées ([Xu *et al.*, 2012]).

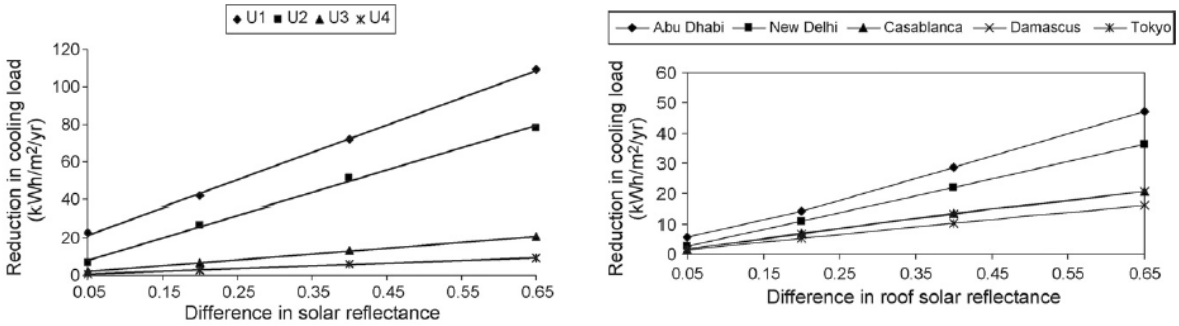

FIGURE 2.33 – Courbes de réduction des besoins en fonction de l'augmentation de la réflectivité pour différents climats et différents niveaux d'isolation (source : [Synnefa *et al.*, 2007])

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Dans les climats où les besoins de chauffage sont beaucoup plus importants que les besoins de rafraîchissement (New-York, Tokyo, Mexico), l'économie réalisée sur les besoins de rafraîchissement ne permet pas toujours de compenser l'augmentation des besoins de chauffage due à la diminution du rayonnement solaire absorbé par le bâtiment en période de besoin de chauffage ([Synnefa *et al.*, 2007] et [Shen *et al.*, 2011]). L'utilisation de ces revêtements n'est donc pas toujours intéressante et d'autres solutions plus adaptables existent.

2.2.2.3.2 Revêtements thermochromes

Le paragraphe précédent a montré que les revêtements dits rafraîchissants (en fait réflecteurs en courtes longueurs d'onde) ont une influence non seulement sur les besoins de rafraîchissement des bâtiments mais également sur les besoins de chauffage qu'ils augmentent. Pour éviter cet effet non désiré, des pigments thermochromes existent et peuvent être micro-encapsulés et intégrés à des revêtements de surface. Il est alors possible de concevoir des revêtements thermochromes dont les propriétés radiatives varient en fonction de la température extérieure, ce qui peut permettre de contrôler l'absorption du rayonnement solaire en fonction de la saison ou du moment de la journée. Dans [Karlessi *et al.*, 2009], des revêtements thermochromes colorés ont été comparés à des revêtements réflecteurs et normaux. Dans cette étude, six différentes couleurs de revêtements ont été testées pour deux teintes différentes (clair et foncé). Les échantillons ont été exposés pendant la période estivale à Athènes et leur température de surface ainsi que leur réflectivité solaire ont été mesurées. Pour tous les échantillons, la température de transition est de 30°C.

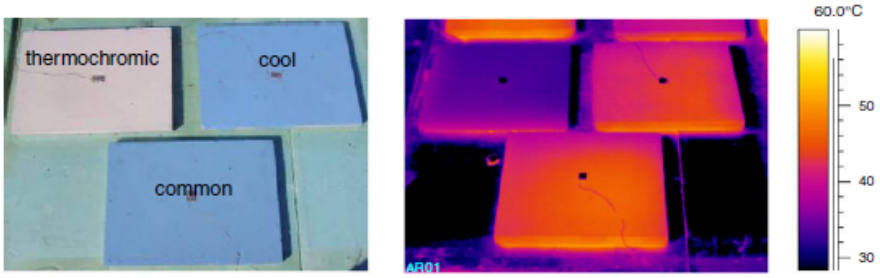

FIGURE 2.34 – État de surface et vision infra-rouge des différents échantillons pour la couleur bleue d'après [Karlessi *et al.*, 2009]

Les résultats montrent qu'en été, la température de surface des échantillons thermochromes est inférieure à celle des échantillons de référence (réflecteurs et standards). Les spectres de réflexion montrent que la performance des peintures dépend de leur couleur : les changements de réflectivité maximaux sont atteints pour les revêtements vert clair et marron alors que la variation minimale est obtenue avec le revêtement jaune. Dans tous les cas les revêtements thermochromes ont une réflectivité plus importante dans leur état décoloré que les revêtements normaux et même réflecteurs, avec des différences pouvant aller jusqu'à 30%. Ils sont donc plus efficaces.

Dans leur état coloré, et donc a priori « absorbant », les revêtements ont une réflectivité qui reste supérieure à celle des matériaux rafraîchissants et normaux, ce qui ne favorise pas l'absorption des apports solaires d'hiver. De plus ces matériaux présentent des problèmes de durabilité qui n'ont pas encore été résolus et qui dégradent leurs performances notamment dans la réflexion des UV et du rayonnement visible. Ainsi, des progrès restent encore à effectuer dans la mise au point de revêtements thermochromes même si c'est une voie qui semble prometteuse.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2.3 Utilisation de l'air extérieur

Dans le cas le plus simple, la ventilation d'un bâtiment s'effectue en prélevant de l'air extérieur neuf dans l'environnement du bâtiment et en y rejetant l'air vicié. Cette circulation d'air peut être naturelle, grâce à des ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment, ou mécanique à l'aide de ventilateurs qui assurent un débit d'air contrôlé. La différence de température extérieure estivale entre le jour et la nuit peut alors être exploitée pour rafraîchir les bâtiments : on peut augmenter alors le débit de ventilation, soit en multipliant les entrées et sorties d'air (ouverture des fenêtres) en ventilation naturelle, soit directement par le contrôle de la ventilation mécanique (vitesse des ventilateurs). On parle alors de ventilation, ou de sur-ventilation, nocturne. Le flux enthalpique échangé entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment est alors égal à :

$$\Phi = \dot{m}C_p(T_a - T_{int}) \tag{2.30}$$

avec $\dot{m}$ le débit de ventilation, C_p la capacité thermique de l'air, T_a la température de l'air extérieur et T_{int} la température de l'air intérieur.

L'efficacité de la surventilation nocturne est donc très dépendante du débit utilisé, qui doit être choisi notamment en fonction du volume d'air à ventiler. Pour s'affranchir de cette considération et pouvoir comparer les résultats sur des bâtiments de volumes différents, on utilise plutôt le taux de renouvellement d'air qui s'exprime en $\mathrm{vol{\cdot}h^{-1}}$ et qui est donc égal à :

$$\tau_{ventil} = \frac{3600\dot{m}}{\rho_a V_{int}} \tag{2.31}$$

avec ρ_a masse volumique de l'air et V_{int} le volume d'air intérieur.

L'ADEME préconise ainsi un taux de renouvellement d'air supérieur à $5\,\mathrm{vol{\cdot}h^{-1}}$ et si possible proche de $10\,\mathrm{vol{\cdot}h^{-1}}$ pour que la surventilation nocturne soit réellement efficace.

Cette technique est largement utilisée dans les bâtiments tertiaires qui ne sont pas occupés la nuit et qu'il est donc possible de surventiler sans créer d'inconfort, mais moins systématisée dans les bâtiments résidentiels. Santamouris ([Santamouris *et al.*, 2010]) étudie donc l'impact de la sur-ventilation nocturne sur les besoins de rafraîchissement d'un échantillon de 200 maisons individuelles en Grèce. Il ressort de cette étude que la réduction des besoins de rafraîchissement est proportionnelle aux besoins initiaux selon le taux de renouvellement d'air appliqué (figure 2.35).

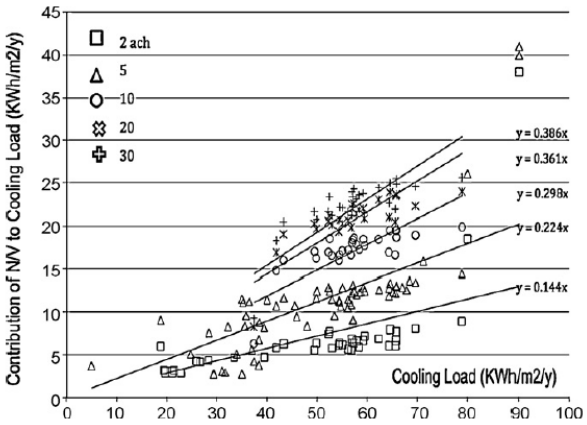

FIGURE 2.35 – Efficacité de la surventilation nocturne dans des bâtiments résidentiels à Athènes en fonction des besoins de rafraîchissement initiaux et du taux de renouvellement d'air appliqué (d'après [Santamouris *et al.*, 2010])

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Lorsque le bâtiment n'est pas équipé de système de rafraîchissement actif, on mesure l'efficacité de la ventilation nocturne par la baisse de température dans le bâtiment. Santamouris estime que la réduction de température du jour suivant la ventilation nocturne peut être de l'ordre de 3°C ([Santamouris *et al.*, 2010]).

2.3 Des ressources utiles peu connues et des technologies bioclimatiques mal évaluées

Trois ressources de l'environnement ont été décrites dans une première partie : le rayonnement solaire, la voûte céleste et l'air extérieur. Pour chacune de ces ressources, on a présenté les phénomènes physiques mis en jeu et l'état des connaissances sur leur caractérisation pour une utilisation par l'enveloppe du bâtiment. Les trois ressources peuvent être mesurées dans des stations météorologiques ou estimées à l'aide de ces données. Certaines d'entre elles, le soleil et le ciel, peuvent également être définies à partir de modèles plus ou moins complexes. En un lieu donné, les ressources énergétiques de l'environnement d'un bâtiment sont donc connues. Cependant, mise à part la position géographique, d'autres paramètres sont également à prendre en compte pour la définition de ces ressources, comme la couverture nuageuse (pour le soleil et le ciel), le degré d'urbanisation et la morphologie des rues (pour les trois ressources). Ainsi la description de l'environnement énergétique d'un bâtiment n'est pas aussi précise dans un environnement complexe (typiquement en ville) que dans un environnement simple (milieu rural) où sont localisées la plupart des stations météorologiques. Enfin, on n'a jamais réellement cherché à décrire l'utilité de ces ressources par rapport aux besoins du bâtiment : elles sont souvent décrites par des moyennes qui ne reflètent pas leur potentiel « utile ».

Les technologies bioclimatiques, censées exploiter les trois ressources de l'environnement précédemment décrites, sont présentées dans une seconde partie. On constate que, quelle que soit la technologie utilisée, sa performance est toujours évaluée en fonction de la réduction des besoins ou de l'inconfort qu'elle permet, mais jamais par rapport au gisement énergétique qu'elle exploite. Or c'est la fonction première des enveloppes bioclimatiques, et c'est également toute leur originalité par rapport à l'isolation thermique. De plus, certaines exploitent en fait plusieurs ressources, comme les parois double-peau (soleil et air) ou les revêtements réflecteurs (soleil et ciel), et la caractérisation de leur performance uniquement à partir de la réduction des besoins du bâtiment ne permet pas de distinguer l'apport de chaque ressource.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Chapitre 3

Nouvelle approche d'évaluation de la performance bioclimatique des bâtiments

Comme le montre le Chapitre 2, l'évaluation de la ressource énergétique de l'environnement est assez aisée : il suffit pour cela de disposer du fichier météorologique et d'y puiser l'information dont on a besoin. Mais l'estimation de cette « quantité » n'apprend rien sur la « qualité » de la ressource, et notamment sur son « utilité » au regard des besoins du bâtiment. Sans cette information, que l'on pourrait qualifier de « qualité énergétique » ou « potentiel énergétique » de l'environnement, les technologies bioclimatiques ne peuvent être évaluées au regard du potentiel qu'elles peuvent exploiter, mais seulement en fonction de leur aptitude à réduire les besoins : cela ne les distingue pas des solutions classiques, basées sur la réduction des déperditions.

Ainsi, faute de points de repère clairs sur la qualité énergétique de l'environnement, mais aussi sur la qualité bioclimatique des solutions constructives, le recours aux technologies bioclimatiques n'est pas un réflexe dans les processus de conception et de réhabilitation. Il en résulte un manque de « conscience bioclimatique » et un quasi monopole du recours à l'isolation, même lorsque poussée à l'extrême les progrès énergétiques qu'elle permet deviennent négligeables.

Pour faire exister cette « conscience bioclimatique », il va être nécessaire de créer une dynamique nouvelle, fondée sur des méthodes claires et simples, permettant :

- de définir les ressources énergétiques de l'environnement, et de quantifier leur utilité au regard des besoins du bâtiment,
- d'évaluer des solutions techniques en termes d'exploitation des ressources utiles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.1 Limites de l'approche classique et bases d'une nouvelle démarche

3.1.1 Des technologies bioclimatiques peu utilisées

Malgré des efforts conséquents de recherche et de dissémination de la part des pouvoirs publics, les technologies d'enveloppe exploitant les ressources énergétiques de l'environnement (et particulièrement le soleil) présentées au chapitre 2 ne font actuellement pas l'objet d'une diffusion massive sur les chantiers de construction et de réhabilitation. Au contraire, le recours à des solutions bioclimatiques reste souvent le résultat d'initiatives expérimentales et individuelles, non encadrées par des textes de référence, ce qui ne favorise pas la constitution d'un fonds commun de connaissances et de bonnes pratiques dans ce domaine.

Cet échec est peut-être dû à la difficulté d'évaluer les performances de ce type de composant. En effet, la performance des solutions bioclimatiques dépend, et de façon complexe, de la zone climatique, de l'orientation du bâtiment, ou encore du dimensionnement de leurs composants d'enveloppe. La fiabilité de ces solutions et la reproductibilité de leurs performances n'est alors pas toujours garantie et leur impact sur les besoins du bâtiment est plus difficile à évaluer. La plupart du temps la conception de bâtiments à haute performance énergétique met l'accent sur l'isolation, une solution simple et efficace du seul point de vue de la réduction des besoins. Mais l'efficacité de ces solutions s'émousse assez rapidement et à partir d'un certain niveau d'isolation le gain sur les performances du bâtiment est minime.

Pour rendre les technologies bioclimatiques aussi banales que celles de l'isolation, il semblerait intéressant de les adosser à des repères de conception simples, sur deux points :

- D'une part, l'évaluation de la qualité énergétique de l'environnement d'un bâtiment, par la qualification et la quantification des ressources énergétiques utiles pour couvrir les besoins du bâtiment,
- D'autre part, l'évaluation de la performance bioclimatique des différentes technologies d'enveloppe, par la mesure de leur aptitude à exploiter les ressources utiles de l'environnement.

3.1.2 Qualité énergétique de l'environnement

La conception d'un bâtiment bioclimatique et de son enveloppe doit tout d'abord être guidée par la connaissance des ressources de l'environnement, et plus particulièrement de leur utilité au regard des besoins du bâtiment. Cette démarche s'appuie donc à la fois sur la connaissance des ressources énergétiques disponibles dans l'environnement, et sur l'usage du bâtiment. C'est la combinaison de ces deux aspects qui peut permettre de quantifier l'utilité de l'environnement, sa qualité énergétique.

Les traités d'architecture bioclimatique (comme [Nicolas et Vaye, 1978], [Mazria, 1979] ou [Camous et Watson, 1983 prennent généralement en compte ces deux dimensions, en orientant souvent la conception du bâtiment en fonction de l'ensoleillement moyen et des vents dominants. Ils proposent par exemple d'organiser les pièces d'un logement suivant leur fonction et le moment de la journée pendant lequel elles vont être occupées. En adaptant également la taille des parois vitrées, ces traités permettent ainsi d'utiliser la course du soleil et donc d'optimiser les apports solaires directs. De même, grâce à l'approche géométrique du rayonnement solaire direct, on est capable de déterminer la géométrie idéale d'une casquette permettant de laisser passer les rayons du soleil d'hiver et de bloquer les rayons estivaux.

Cependant, certains aspects sont moins bien connus. C'est le cas par exemple du rayonnement solaire diffus qui est rarement pris en compte dans la conception des bâtiments. En effet, il est souvent conseillé

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

de réduire le plus possible les surface vitrées sur la façade nord d'un bâtiment en considérant que cette dernière ne reçoit pas de rayonnement solaire. Mais si la face nord d'un bâtiment ne reçoit effectivement pas de rayonnement solaire direct en période de chauffage, elle reçoit cependant un rayonnement diffus qui ne dépend pas de l'orientation et qui peut aisément dépasser les puissances de chauffage nécessaires. Il semble donc intéressant d'essayer de décrire la qualité énergétique de l'environnement d'un bâtiment non pas en fonction d'idées préconçues mais selon une approche objective et quantifiée, reposant sur la comparaison entre ressources disponibles et besoins réels.

Cette qualité énergétique de l'environnement est guidée par la notion d'utilité de la ressource pour le bâtiment. Dans notre approche, cette utilité sera définie par la concomitance entre les ressources et les besoins. En effet, plus les ressources seront en phase avec les besoins, plus le besoin de stockage sera réduit, et plus l'exploitation des ressources par le bâtiment sera facile.

3.1.3 Performance bioclimatique de l'enveloppe d'un bâtiment

Le besoin énergétique d'un bâtiment est le résultat d'un bilan entre ses apports et ses pertes. Le mode de conception classique met principalement l'accent sur la réduction des pertes. La réalité technico-économique milite effectivement en ce sens pour amener le bâtiment à un niveau de performance correct. Mais s'il faut aller au-delà, on constate que la voie de l'isolation offre des gisements de performance de plus en plus faible. C'est là que le recours aux solutions bioclimatiques (mieux profiter des apports) se justifie. Ainsi, en faisant de l'exploitation des ressources un critère de performance au même titre que la diminution des besoins, on permettrait aux solutions bioclimatiques de s'affirmer comme des composantes pertinentes de l'efficacité énergétique des bâtiments.

Dans cette optique, l'idée d'une méthode permettant d'évaluer l'enveloppe d'un bâtiment également en fonction de son aptitude à exploiter les ressources semble séduisante : elle pourrait permettre d'apprécier de manière objective les performances de cette enveloppe et d'encourager la réduction des besoins énergétiques des bâtiments grâce à l'exploitation des ressources. Les efforts de recherche porteraient alors sur l'amélioration de la performance bioclimatique des composants, ce qui permettrait peut être de dépasser les limitations rencontrées avec la démarche classique d'isolation.

3.1.4 Bases de la nouvelle approche

Cette nouvelle approche repose donc sur deux grands principes :

- Quantifier l'utilité des ressources par rapport aux besoins du bâtiment.
- Quantifier l'utilisation de ces ressources utiles par le bâtiment.

Pour mener à bien cette démarche, nous avons choisi d'utiliser la modélisation énergétique qui permet non seulement de sélectionner les stimuli environnementaux interagissant avec le bâtiment, afin de mieux observer leur impact, mais également de tester différentes configurations (zone climatique, niveau d'isolation...) pour un même bâtiment. En simulant le comportement du bâtiment dans son environnement, on obtient alors de nombreuses données de sorties (besoin énergétique, températures d'air, températures de surfaces) qui nous permettront de définir un jeu d'indicateurs quantifiant à la fois le gisement des ressources et l'exploitation qu'en fait le bâtiment.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2 Mesure de la performance bioclimatique d'un bâtiment : les indicateurs

Pour aborder cette partie, nous nous inspirons d'une démarche initiée par P. Tittelein qui cherche à quantifier la part du flux solaire valorisée par le bâtiment, de manière active ou passive ([Tittelein, 2008]). L'originalité de sa démarche réside dans le fait de comparer le comportement du bâtiment dans deux simulations :

- une simulation classique du bâtiment dans son environnement,
- une simulation du bâtiment dans un environnement sans flux solaire.

Il est alors possible de comparer les besoins du bâtiment dans les deux cas et de définir ainsi avec objectivité et précision la part de la ressource effectivement utilisée par le bâtiment : c'est en effet la différence entre les besoins de la simulation sans le soleil et les besoins de la simulation classique.

Cette approche peut être étendue et généralisée à tous les usages d'un bâtiment (chauffage, rafraîchissement, éclairage, électricité spécifique, ECS, ...) et à toutes les ressource environnant ce bâtiment. On considère donc m usages notés $(U_1, ..., U_i, ..., U_m)$ et n ressources notées $(R_1, ..., R_j, ..., R_n)$. Tous les indicateurs que nous allons définir par la suite seront relatifs à un usage et une ressource donnés et ils seront calculés à chaque instant en puissance, avant d'être intégrés sur la période pour laquelle on veut connaître la performance du bâtiment ou d'une solution d'enveloppe.

3.2.1 La notion de besoin : besoin résiduel et besoin réel pour chaque ressource

Dans le principe de cette démarche, toutes les ressources de l'environnement peuvent avoir une influence sur tous les besoins d'un bâtiment, même si aucun dispositif particulier n'est mis en place pour exploiter ces ressources. Les besoins obtenus à partir de la simulation classique d'un bâtiment dans son environnement avec toutes les ressources sont généralement appelés besoins résiduels car c'est l'énergie qu'il « reste » à fournir par les systèmes (de chauffage, de rafraîchissement, d'éclairage) énergétiques du bâtiment une fois les ressources environnementales exploitées. On est là dans la définition la plus classique du besoin énergétique notamment pour ce qui concerne le chauffage, la notion qui a permis de définir le coefficient B de la réglementation thermique de 1982 ([RT1, b]). En sortie de simulation, on obtient donc un besoin résiduel correspondant à chacun des usages : le besoin résiduel correspondant à l'usage U_i est donc issu de la simulation standard, avec toutes les ressources, et il est noté $b_{U_i}(t)$.

Mais pour notre approche il va être nécessaire de définir une autre notion de besoin. Nous en verrons bientôt les raisons, mais nous devons également définir la notion de besoin énergétique du bâtiment en l'absence d'une des ressources. Cette notion permet effectivement de connaître les besoins du bâtiment tels qu'il seraient sans la ressource en question et sera donc très précieuse dans notre approche. C'est ici que la simulation numérique se révèle utile car, en supprimant une ressource en entrée, on peut simuler le comportement du bâtiment sans l'impact de cette ressource, et donc connaître les besoins du bâtiment tels qu'il seraient sans cette ressource. C'est ce qu'on va appeler les besoins réels par rapport à une ressource. Le besoin réel correspondant à l'usage U_i sans la ressource R_j est noté $b_{U_i-R_j}(t)$ à chaque instant et il est calculé comme le besoin instantané relatif à l'usage U_i dans la simulation sans la ressource R_j.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

A chaque instant, on obtient donc un vecteur des besoins résiduels $b_U(t) = [b_{U_i}(t)]_{1 \leq i \leq m}$ et une matrice des besoins réels $b_{U-R}(t) = [b_{U_i - R_j}(t)]_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}}$. Ces besoins sont calculés à chaque instant en puissance et il sont ensuite intégrés (en énergie) sur la période voulue :

$$B_{U_i - R_j} = \int_{\text{période}} b_{U_i - R_j}(t) dt \tag{3.1}$$

et

$$B_{U_i} = \int_{\text{période}} b_{U_i}(t) dt \tag{3.2}$$

3.2.2 Indicateurs de potentiel : simultanéité des ressources et des besoins

Dans cette partie, nous allons aborder la question de l'« utilité » d'une ressource pour un besoin particulier. Dans notre approche nous allons considérer que la manière la plus simple de valoriser une ressource est de le faire de manière instantanée. Il s'agit certes d'une vision très simplifiée de la réalité, car tout bâtiment peut stocker une partie des ressources thermiques, mais cette approche se justifie par un double principe. D'une part, si le stockage est une variable de notre démarche, alors la question est réglée : il suffit de stocker l'hiver pour restituer l'été et vice-versa, mais la problématique n'est plus la même. On entre plutôt dans une logique de volumes importants et de matériaux adaptés et moins dans une logique de conception de bâtiment. D'autre part, chercher à maximiser l'exploitation des ressources immédiatement disponibles permet de réduire les besoins de stockage, et donc les volumes à y consacrer. En un mot, en cherchant l'immédiateté on peut aboutir à des besoins de stockage faibles et sur des courtes durées. Ainsi, pour cette approche « idéalisée », nous considèrerons une ressource comme « utile » si elle est effectivement disponible dans l'environnement au moment où le bâtiment en a besoin.

3.2.2.1 Potentiel total d'une ressource

Avant d'aborder la notion de ressource utile, il faut connaître la quantité totale de ressource présente dans l'environnement à chaque instant. En effet, les sources d'énergie renouvelable de l'environnement ne sont pas « infinies » : à chaque instant, la quantité d'énergie que le bâtiment peut échanger avec ces ressources est limitée, ne serait-ce qu'à cause de la surface de l'enveloppe du bâtiment, qui elle est bien finie. Il est donc nécessaire de connaître ce potentiel énergétique, que l'on peut qualifier de « total », puisqu'on ne se limite pas pour le moment aux seuls instants où le bâtiment en a besoin. Ainsi, on définit à chaque instant le potentiel total $ptot_{R_j}(t)$ d'une ressource R_j, comme la totalité du flux échangé entre la ressource et le bâtiment à chaque instant. Sur une période donnée, le potentiel total de la ressource R_j est égal à :

$$Ptot_{R_j} = \int_{\text{période}} ptot_{R_j}(t) dt \tag{3.3}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2.2.2 Potentiel d'une ressource concomitant à un besoin

Le potentiel total d'une ressource ne permet cependant pas de répondre à la question du gisement utile. En effet, les ressources de l'environnement ne sont pas nécessairement en phase avec les usages qu'elles peuvent éventuellement couvrir. Dans notre approche, nous caractérisons l'utilité d'une ressource par sa simultanéité au besoin. Pour évaluer cette simultanéité, on peut comparer le potentiel total d'une ressource aux besoins non encore impactés par cette ressource, c'est-à-dire aux besoins réels. Ainsi, à chaque instant, le potentiel d'une ressource R_j concomitant à l'usage U_i est pris égal au potentiel total de la ressource R_j si les besoins réels associés à l'usage U_i existent, sinon il est nul. En résumé, le potentiel concomitant d'une ressource R_j pour un usage U_i est calculé à chaque instant de la façon suivante :

$$pconc_{U_i,R_j}(t) = \begin{cases} ptot_{R_j}(t) & \text{si} \quad b_{U_i-R_j}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.4}$$

Le potentiel concomitant est ensuite intégré sur une période donnée et peut être comparé aux besoins réels sur la même période :

$$Pconc_{U_i,R_j} = \int_{periode} pconc_{U_i,R_j}(t)dt \tag{3.5}$$

3.2.2.3 Potentiel d'une ressource ajusté à un besoin

Une fois intégré sur une période donnée, le potentiel concomitant d'une ressource ne permet pas de savoir si à chaque instant le besoin peut être couvert par la ressource. En effet, pendant cette période, le potentiel instantané peut être inférieur au besoin, voire nul (c'est typiquement le cas du soleil la nuit en hiver), alors que sa valeur intégrée sur une période assez longue peut être supérieure à l'intégrale des besoins réels. Pour évaluer l'aptitude d'une ressource à couvrir les besoins à chaque instant, nous définissons un nouvel indicateur. Celui-ci limite l'utilité du potentiel non seulement dans le temps, comme le potentiel concomitant, mais également en valeur : on définit ainsi à chaque instant le potentiel d'une ressource R_j ajusté à un usage U_i comme la partie de l'énergie disponible de la ressource qui permet de couvrir strictement les besoins réels associés à cet usage. Autrement dit lorsque le potentiel est supérieur au besoin instantané, on ne garde que la valeur écrêtée par ce besoin. Et lorsque le potentiel est inférieur au besoin, on conserve cette valeur. Ainsi, en résumé, le potentiel ajusté est égal à chaque instant au minimum entre le potentiel total et le besoin réel :

$$paj_{U_i,R_j}(t) = \min(ptot_{U_j}(t), b_{U_i-R_j}(t)) \tag{3.6}$$

Comme les indicateurs précédents, il peut être intégré sur la période voulue :

$$Paj_{U_i,R_j} = \int_{\text{période}} paj_{U_i,R_j}(t)dt \tag{3.7}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2.3 L'exploitation du potentiel des ressources par la comparaison entre besoin réel et besoin résiduel

Comme pour le calcul de l'efficacité solaire ([Tittelein, 2008]), on peut définir la part d'une ressource R_j qui a été exploitée par le bâtiment pour un usage U_i comme la différence à chaque instant entre les besoins réels et résiduels associés à cette ressource et à cet usage :

$$pexp_{U_i,R_j}(t) = b_{U_i-R_j}(t) - b_{U_i}(t) \tag{3.8}$$

On peut ensuite intégrer cette quantité dans le temps pour obtenir le potentiel exploité sur une période donnée :

$$Pexp_{U_i,R_j} = \int_{\text{période}} pexp_{U_i,R_j}(t)dt \tag{3.9}$$

Une valeur positive du potentiel exploité indique que le bâtiment utilise la ressource pour diminuer les besoins associés à l'usage concerné, c'est-à-dire que l'impact de la ressource est positif. Au contraire, un potentiel exploité négatif traduit le fait que la ressource crée un besoin supplémentaire, et est donc néfaste pour l'usage concerné.

Pour comparer l'aptitude de plusieurs bâtiments ou plusieurs solutions techniques à exploiter les ressources de l'environnement, des indicateurs relatifs sont utiles. On peut ainsi définir, à partir de la notion de potentiel exploité, trois indicateurs complémentaires :

- un indicateur qui donne le pourcentage du potentiel utile d'une ressource effectivement exploité par le bâtiment,
- un indicateur qui donne le pourcentage des besoins réels couverts par la ressource si le potentiel exploité est positif.
- un indicateur qui donne le pourcentage des besoins résiduels engendrés par la ressource si le potentiel exploité est négatif.

Ces trois indicateurs relatifs, ne sont pas calculés à chaque instant, mais sur une période donnée, à partir des valeurs intégrées des indicateurs absolus. Cela permet d'éviter les problèmes de définition des indicateurs lorsque le dénominateur s'annule par moments sur la période en question.

Le premier indicateur est appelé taux d'exploitation de la ressource R_j par le bâtiment pour un usage U_i, et il est défini comme le rapport entre le potentiel exploité et le potentiel concomitant de la ressource R_j :

$$\tau exp_{U_i,R_j} = \frac{Pexp_{U_i,R_j}}{Pconc_{U_i,R_j}} \tag{3.10}$$

Si le potentiel exploité est positif, on peut définir un deuxième indicateur, le taux de couverture des besoins associés à l'usage U_i par la ressource R_j. Il est calculé comme le rapport entre le potentiel exploité et les besoins réels associés à cet usage :

$$\tau couv_{U_i,R_j} = \frac{Pexp_{U_i,R_j}}{B_{U_i-R_j}} \tag{3.11}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Si le potentiel exploité est négatif, on parle plutôt de besoin généré $Bgen_{U_i,R_j} = -Pexp_{U_i,R_j}$, et on définit le taux de génération des besoins résiduels par une ressource :

$$\tau gen_{U_i,R_j} = \frac{Bgen_{U_i,R_j}}{B_{U_i}} \tag{3.12}$$

Ces trois indicateurs ne peuvent pas réellement être définis et utilisés à chaque instant car le dénominateur peut s'annuler (lorsque le potentiel concomitant ou les besoins sont nuls), et les taux de performance sont alors fictivement infinis. C'est pour cette raison qu'ils sont uniquement calculés à partir des quantités intégrées lorsque les dénominateurs ne s'annulent pas.

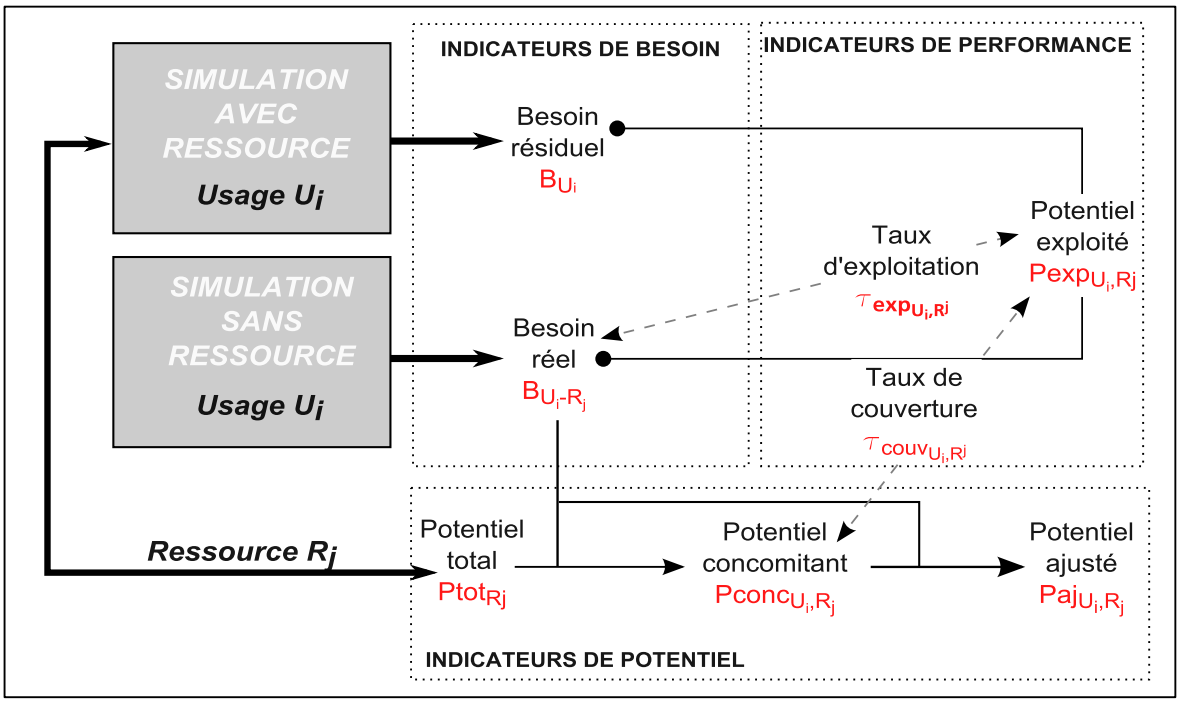

FIGURE 3.1 – Diagramme général des indicateurs

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.3 Application de cette approche pour le confort thermique d'un bâtiment

Cette méthode, qui reste à ce stade de l'explication assez théorique, peut être appliquée et illustrée sur des ressources et des besoins précis. Ainsi nous pouvons définir précisément les indicateurs introduits dans la section précédente pour les trois ressources de l'environnement présentées au chapitre 3 (soleil, ciel et air) et deux usages du confort thermique (chauffage et rafraîchissement). Le calcul des besoins correspondant aux usages peut s'effectuer de manière simple en considérant par exemple deux températures de consignes : T_C pour le chauffage et T_R pour le rafraîchissement.

Pour calculer nos indicateurs avec trois ressources, il est nécessaire d'effectuer quatre simulations du bâtiment étudié (une avec toutes les ressources et une pour chaque ressource à supprimer). La suppression de chacune des trois ressources s'effectue de la manière suivante.

- pour le soleil : on annule les flux solaires directs et diffus des données météorologiques.
- pour le ciel : on fixe la température de ciel égale à la température extérieure,
- pour l'air : on annule le taux de renouvellement d'air, tout en conservant les infiltrations qui n'ont pas de lien avec la ventilation.

Dans chaque simulation, on récupère les besoins de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment pour pouvoir les comparer au potentiel des ressources. On calcule ensuite les indicateurs définis dans la partie précédente :

- Les indicateurs de besoin permettent tout d'abord de définir la nature de la ressource (source ou puits de chaleur). Ils sont également à la base du calcul des autres indicateurs et permettent de définir les notions de potentiel concomitant et ajusté, ainsi que la notion de potentiel exploité.
- Les indicateurs de potentiel peuvent être comparés aux besoins et indiquent, pour chaque ressource, si elle est en quantité nécessaire pour satisfaire les besoins à chaque instant.
- Les indicateurs de performance permettent d'évaluer la quantité d'énergie exploitée, pour chaque ressource, par le bâtiment. Ils peuvent être calculés de manière absolue ou relative si on les compare aux besoins ou au potentiel de chaque ressource.

Pour caractériser le mieux possible les ressources et l'exploitation qui peut en être faite par un bâtiment, tous les indicateurs seront illustrés dans cette partie sur plusieurs séquences de dix jours, pour différentes saisons :

- la séquence d'hiver s'étend du 19 au 28 janvier (19 au 29e jour de l'année),
- la séquence de mi-saison s'étend du 9 au 18 mai (129 au 139e jour de l'année),
- la séquence d'été s'étend du 19 au 28 juillet (200 au 210e jour de l'année).

3.3.1 Indicateurs de besoin

Les besoins de chauffage et de rafraîchissement obtenus à partir des quatre simulations (référence, sans soleil, sans ciel et sans air) vont nous permettre de caractériser nos sources. En effet, si les besoins de chauffage de la simulation sans soleil sont supérieurs aux besoins de chauffage de la simulation avec soleil, c'est donc que le soleil couvre une partie des besoins de chauffage et représente bien une source de chaleur. Cette conclusion paraît évidente pour le soleil mais elle ne l'est pas nécessairement pour une ressource comme l'air extérieur ou d'autres ressources non testées ici comme le sol par exemple.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.3.1.1 Besoins avec et sans soleil

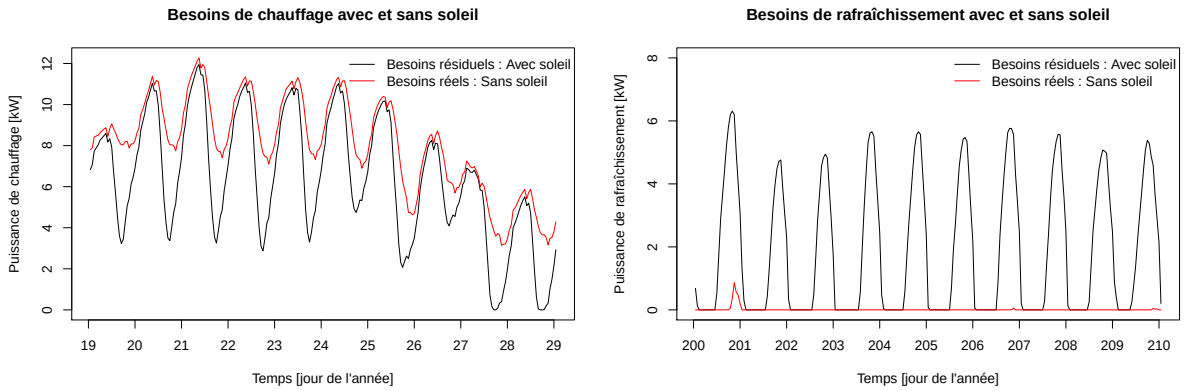

FIGURE 3.2 – Besoins avec et sans soleil d'une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et été à droite)

La figure 3.2 montre que les besoins de chauffage sont plus importants dans la simulation sans soleil (graphique de gauche) que dans la simulation avec soleil, et inversement, que les besoins de rafraîchissement sont plus faibles dans la simulation sans soleil que dans la simulation avec soleil (graphique de droite). Cela confirme que le soleil est bien une source d'énergie et montre également l'intérêt de la notion de besoins réels. En effet, on constate que les besoins de chauffage résiduels (avec soleil) s'annulent chaque jour en été (graphique de gauche), alors que les besoins de chauffage sans soleil sont, sur cette séquence, tout le temps positifs. Cela indique que le soleil couvre une partie des besoins de chauffage et que l'évaluation du potentiel du soleil doit se faire par rapport aux besoins totaux qu'il est censé pouvoir couvrir, c'est-à-dire les besoins sans soleil. Dans la suite on considèrera donc le potentiel du soleil en fonction des besoins de chauffage sans soleil du bâtiment.

3.3.1.2 Besoins avec et sans ciel

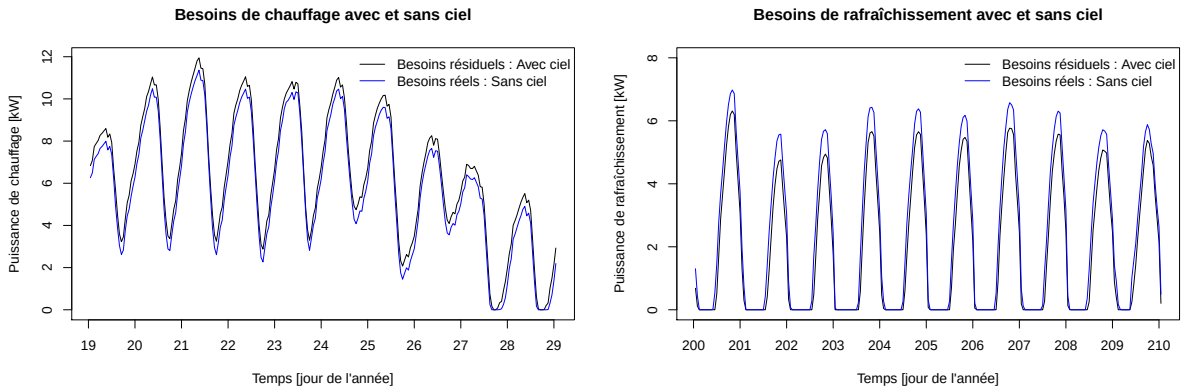

FIGURE 3.3 – Besoins avec et sans ciel d'une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et été à droite)

La figure 3.3 nous montre que même si leur différence est très faible, les besoins de chauffage de la simulation sans ciel sont moins importants que ceux de la simulation avec ciel (graphique de gauche), alors que les besoins de rafraîchissement sans ciel sont plus importants que dans la simulation avec ciel (graphique de droite). Le ciel est donc bien un puits d'énergie pour le bâtiment, et dans la suite on

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

calculera son potentiel en fonction des besoins de rafraîchissement sans ciel du bâtiment.

3.3.1.3 Besoins avec et sans air

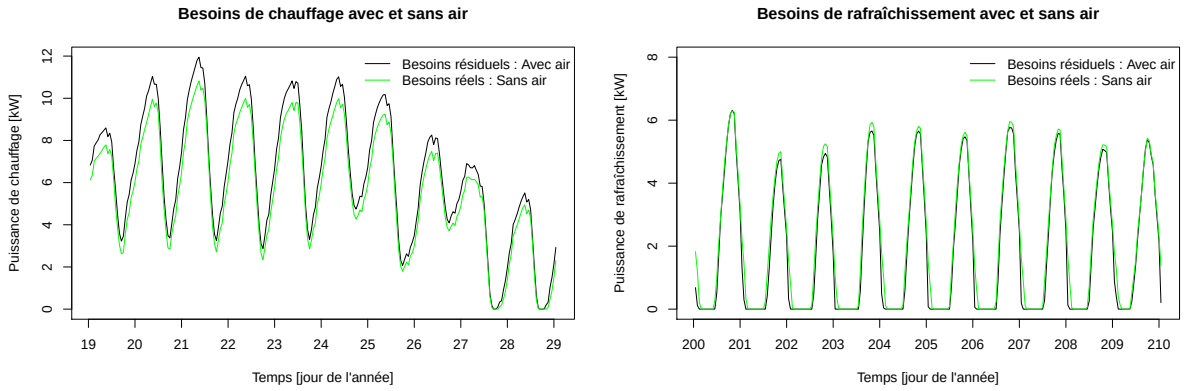

FIGURE 3.4 – Besoins avec et sans air d'une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et été à droite)

Pour l'air (figure 3.4), les conclusions sont les mêmes que pour le ciel : les besoins de chauffage sans air sont plus faibles que les besoins de chauffage avec air (graphique de gauche) et les besoins de rafraîchissement sans air sont plus importants que les besoins de rafraîchissement avec air (graphique de droite). Ainsi, l'air couvre une partie des besoins de rafraîchissement du bâtiment, il s'agit donc bien d'un puits d'énergie. En conséquence, le potentiel de l'air sera comparé aux besoins de rafraîchissement sans air du bâtiment.

3.3.2 Indicateurs de potentiel

D'après ce qui précède, on a donc une source d'énergie (le soleil) et deux puits d'énergie (le ciel et l'air) qu'on peut alors évaluer en fonction des besoins de chauffage et de rafraîchissement réels du bâtiment. Pour ce faire, il est tout d'abord nécessaire de calculer le potentiel total de chacune des ressources.

3.3.2.1 Potentiel total

3.3.2.1.1 Potentiel total du soleil

Le potentiel total instantané du soleil pour un bâtiment est défini comme la somme des flux direct et diffus reçus par toutes les parois du bâtiment :

$$ptot_s(t) = \sum_{\text{Parois}} (Dir(t) + Dif(t))S_p \tag{3.13}$$

La figure 3.5 montre l'évolution du potentiel total du soleil pour une maison individuelle. Cette évolution met en évidence des périodes où le potentiel est nul, caractéristiques d'une ressource intermittente.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

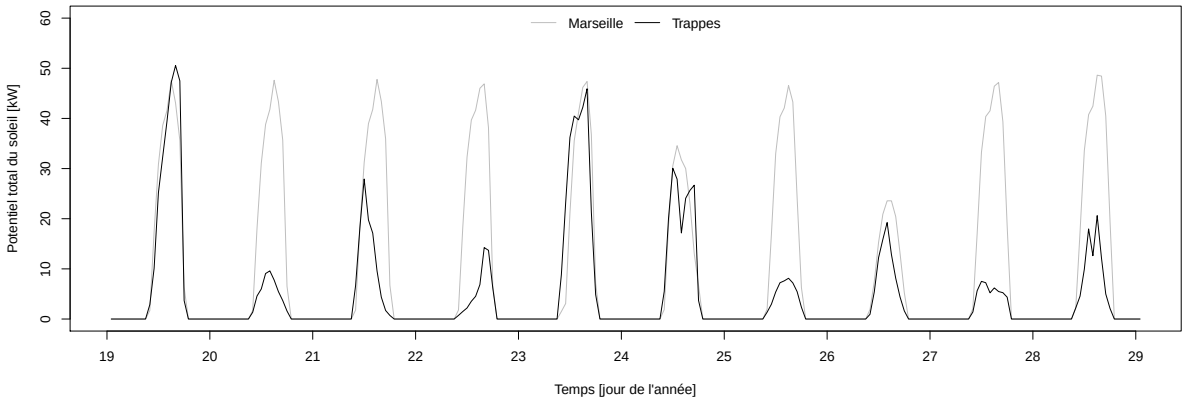

FIGURE 3.5 – Potentiel total du soleil pour une maison individuelle non isolée dans deux climats différents en hiver

3.3.2.1.2 Potentiel total du ciel

Le potentiel total instantané de la voûte céleste est défini comme la totalité du flux net échangé à chaque instant entre le ciel et les parois du bâtiment supposées à la température de l'air extérieur. Cela permet en effet de ne prendre en compte que le potentiel de rafraîchissement par rayonnement avec le ciel, et pas par rayonnement avec l'environnement.

$$ptot_c(t) = \sum_{\text{Parois}} F\varepsilon_p\sigma(T_a^4(t) - T_c^4(t))S_p \tag{3.14}$$

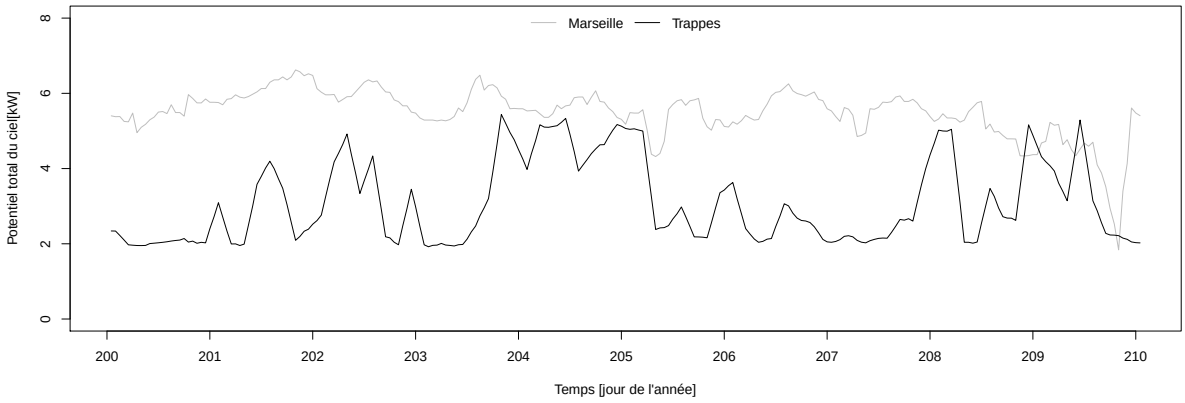

FIGURE 3.6 – Potentiel total du ciel pour une maison individuelle non isolée dans deux climats différents en été

La figure 3.6 montre que le potentiel total du ciel n'est jamais nul. La ressource, bien que très variable dans le temps, est donc toujours disponible.

3.3.2.1.3 Potentiel total de l'air

Le potentiel total instantané de l'air extérieur correspond au flux échangé avec l'air intérieur du bâtiment pour un taux de renouvellement d'air donné à une température de consigne de rafraîchissement donnée T_R. Ici nous avons opté pour un taux de renouvellement d'air de $10\,\mathrm{vol{\cdot}h^{-1}}$ (recommandations de l'ADEME pour une ventilation nocturne efficace).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$ptot_a(t) = \dot{m}(t)C_p(t)(T_a(t) - T_R) \tag{3.15}$$

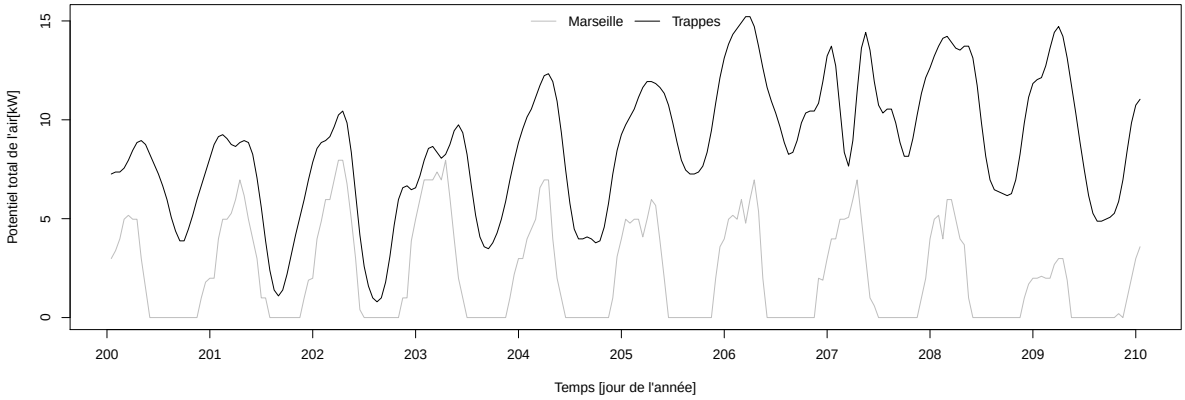

FIGURE 3.7 – Potentiel total de l'air pour une maison individuelle non isolée dans deux climats différents en été

Le potentiel total de l'air est représenté sur la figure 3.7 et on voit que selon le climat c'est une ressource qui peut être intermittente (puisque son potentiel s'annule lorsque la température extérieure est supérieure à la température de consigne de rafraîchissement).

3.3.2.2 Potentiel concomitant

Comme précisé précédemment, le potentiel concomitant du soleil va être défini par rapport aux besoins de chauffage sans soleil, et le potentiel des deux puits d'énergie que sont le ciel et l'air va être défini par rapport aux besoins de rafraîchissement sans ciel et sans air respectivement.

3.3.2.2.1 Potentiel concomitant du soleil

Le potentiel concomitant du soleil est égal au potentiel total si les besoins de chauffage sans soleil existent, sinon il est nul (équation 3.16)

$$pconc_{C,s}(t) = \begin{cases} ptot_s(t) & \text{si} \quad b_{C-s}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.16}$$

La figure 3.8 montre l'évolution du potentiel concomitant du soleil sur deux séquences différentes. On voit qu'en hiver les besoins de chauffage réels ne s'annulent jamais (maison non isolée), et le potentiel concomitant est égal au potentiel total du soleil. En revanche, dans la même configuration mais en mi-saison, les besoins sans soleil peuvent à certaines périodes être nuls. Durant ces périodes le potentiel concomitant s'annule aussi. Ainsi seule une partie du potentiel total est prise en compte dans la détermination du potentiel concomitant. Cela permet donc de ne pas compter comme potentiel concomitant le soleil qui n'a pas d'influence sur des besoins de chauffage déjà nuls mais qui tend plutôt à augmenter les besoins de rafraîchissement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

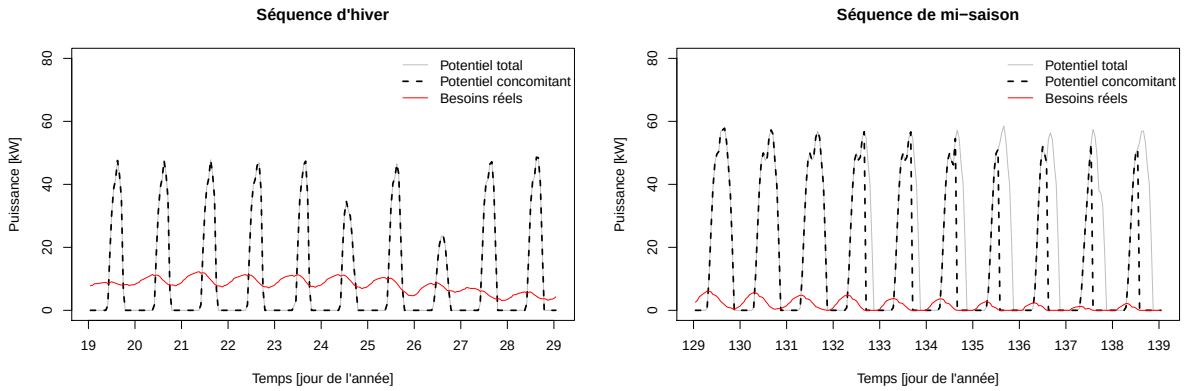

FIGURE 3.8 – Potentiel concomitant du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite)

3.3.2.2.2 Potentiel concomitant du ciel

Le potentiel concomitant du ciel est égal au potentiel total si les besoins de rafraîchissement sans ciel existent, sinon il est nul (équation 3.17).

$$pconc_{R,c}(t) = \begin{cases} ptot_c(t) & \text{si} \quad b_{R-c}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.17}$$

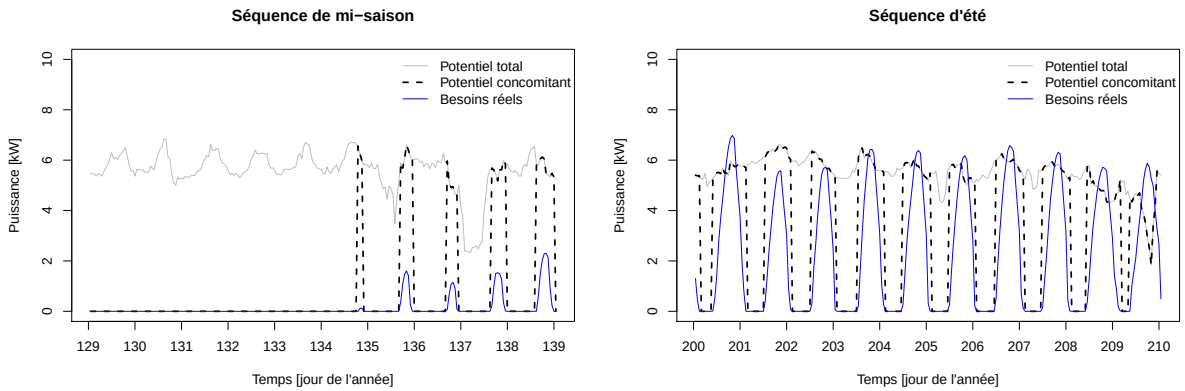

FIGURE 3.9 – Potentiel concomitant du ciel pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite)

La figure 3.9 nous montre que le ciel, bien qu'étant une ressource permanente, a un potentiel concomitant intermittent puisqu'il est calculé par rapport aux besoins de rafraîchissement qui peuvent s'annuler la nuit même en été.

3.3.2.2.3 Potentiel concomitant de l'air

Le potentiel concomitant de l'air est égal au potentiel total si les besoins de rafraîchissement sans air existent, sinon il est nul (équation 3.18).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$pconc_{R,a}(t) = \begin{cases} ptot_a(t) & \text{si} \quad b_{R-a}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.18}$$

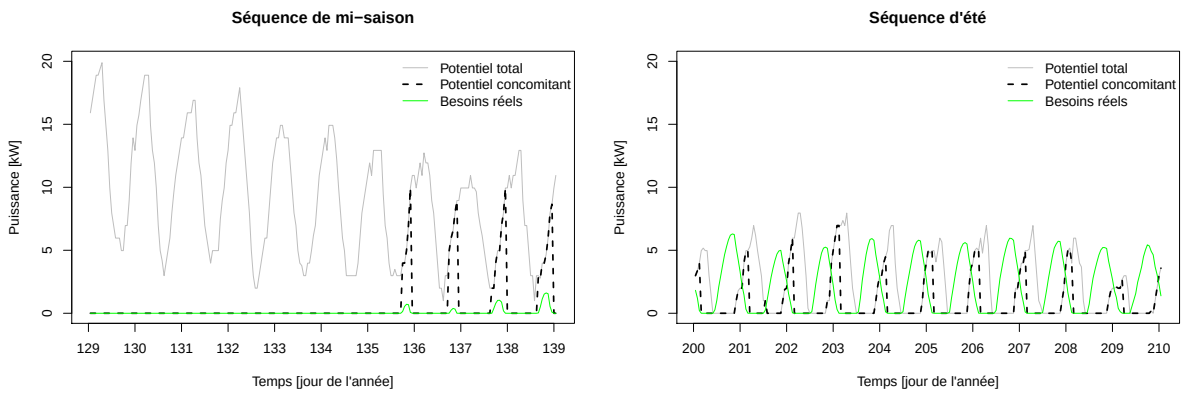

FIGURE 3.10 – Potentiel concomitant de l'air pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite)

La figure 3.10 montre que les périodes prises en compte pour le calcul du potentiel concomitant de l'air correspondent à peu près à l'intégralité des périodes de besoins de rafraîchissement sans air en mi-saison. En effet, le potentiel total de l'air et les besoins de rafraîchissement sans air sont alors en phase à ce moment de l'année (fin de la journée et nuit). En revanche, en été, on voit que les besoins de rafraîchissement sans air sont positifs plus tôt dans la journée alors que le potentiel total de l'air est nul (température extérieure trop élevée) : ainsi, le potentiel concomitant de l'air n'est positif qu'en début de nuit lorsque qu'on a à la fois des besoins de rafraîchissement et du potentiel total.

3.3.2.3 Potentiel ajusté

On a vu que le potentiel concomitant pouvait être très supérieur aux besoins réels d'un bâtiment. Ainsi l'énergie disponible et utile peut être surabondante à chaque instant. Pour se donner une vision limitée aux ressources strictement nécessaires pour couvrir les besoins, nous évaluerons le potentiel ajusté des ressources en comparant leur potentiel total aux besoins réels de chauffage et de rafraîchissement.

3.3.2.3.1 Potentiel ajusté du soleil

Le potentiel ajusté du soleil est le minimum entre les besoins de chauffage réels et le potentiel total (équation 3.19).

$$paj_{C,s}(t) = \min(ptot_s(t), b_{C-s}(t)) \tag{3.19}$$

La figure 3.11 nous montre l'évolution du potentiel ajusté du soleil pour une maison individuelle à Trappes sur deux séquences de dix jours en hiver et en mi-saison (mi mai). Dans les deux cas, on constate que le potentiel ajusté, qui est limité par les besoins de chauffage réels, est beaucoup plus faible que le potentiel total du soleil. Sur ces graphiques, il apparaît donc qu'une quantité importante d'énergie solaire ne soit en réalité pas « utile » pour couvrir les besoins instantanés pendant la journée, alors que la nuit, le potentiel du soleil étant nul, les besoins ne peuvent pas être couverts sans stockage, notamment en hiver.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

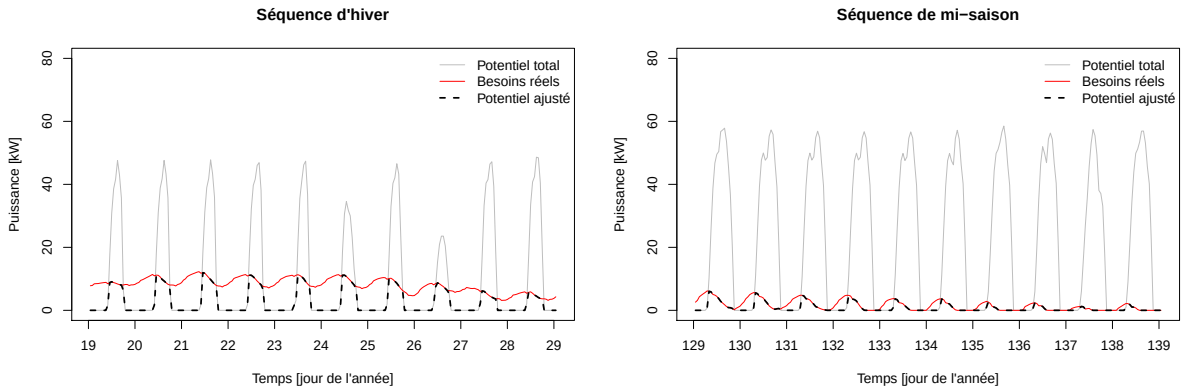

FIGURE 3.11 – Potentiel ajusté du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite)

3.3.2.3.2 Potentiel ajusté du ciel

Le potentiel ajusté du ciel est le minimum entre les besoins de rafraîchissement sans ciel et le potentiel total du ciel (équation 3.20).

$$paj_{R,c}(t) = \min(ptot_c(t), b_{R-c}(t)) \tag{3.20}$$

On constate, sur la figure 3.12, que le potentiel ajusté du ciel est très différent selon la période de l'année. En mi-saison, lorsque les besoins de chauffage sont faibles, le potentiel ajusté est très inférieur au potentiel total du ciel, et une grande partie de ce potentiel total est donc inutile. Sur cette séquence on voit que l'intégrale des besoins de rafraîchissement et celle du potentiel ajusté du ciel sont égales : le ciel peut couvrir les besoins de rafraîchissement à chaque instant. En été, on constate que les besoins et le potentiel total du ciel ont à peu près le même ordre de grandeur, et par conséquent, le potentiel ajusté peut même être limité non pas par les besoins, mais bien par le potentiel total du ciel.

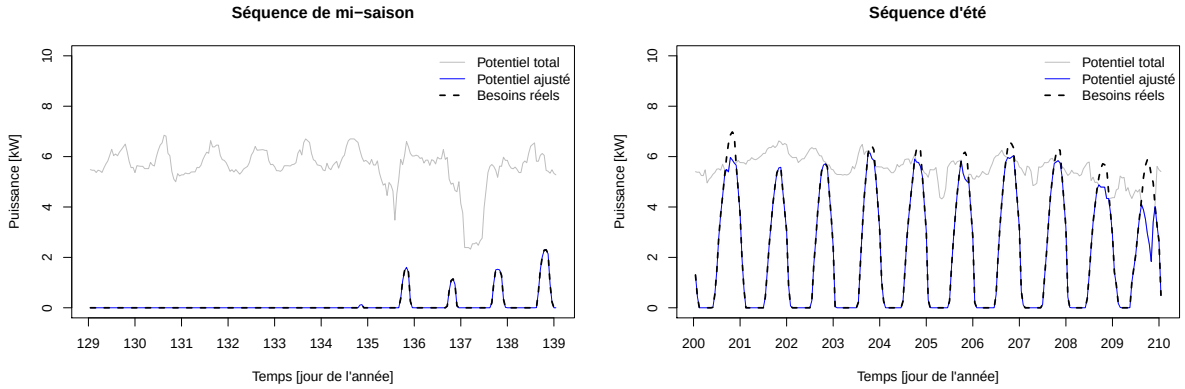

FIGURE 3.12 – Potentiel ajusté du ciel pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.3.2.3.3 Potentiel ajusté de l'air

Le potentiel ajusté de l'air est le minimum entre les besoins de rafraîchissement sans air et le potentiel total de l'air (équation 3.21).

$$paj_{R,a}(t) = \min(ptot_a(t), b_{R-a}(t)) \tag{3.21}$$

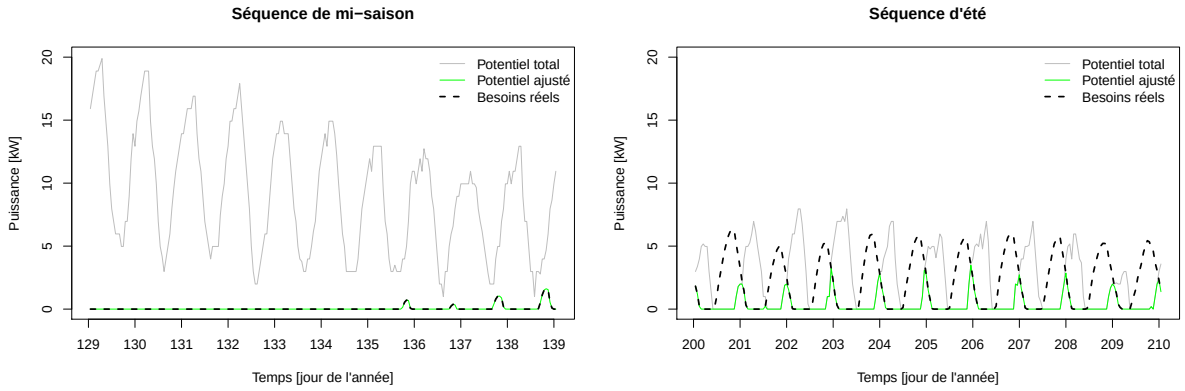

FIGURE 3.13 – Potentiel ajusté de l'air pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite)

Dans le cas de l'air (figure 3.13), comme pour le ciel, on voit qu'en mi-saison, les besoins de rafraîchissement sont plus faibles que le potentiel total de l'air, alors qu'en été ils sont du même ordre de grandeur. Cependant, en été, le potentiel de l'air et les besoins de rafraîchissement sont intermittents et déphasés. Ainsi, le potentiel ajusté, qui est le minimum des deux se retrouve très réduit : les deux courbes coïncident seulement en fin de soirée et sur cette figure on constate que l'intégrale de la courbe de potentiel ajusté est beaucoup plus petite que celle de la courbe des besoins de rafraîchissement (sans stockage les besoins de rafraîchissement ne pourront pas être couverts à chaque instant par l'air).

3.3.3 Indicateurs de performance

3.3.3.1 Potentiel exploité

L'illustration des indicateurs de besoin précédemment définis a montré que dans tous les cas, les besoins obtenus à partir des simulations avec et sans source étaient différents : le sens des différences nous a permis de déterminer la nature de chacune des ressources (source d'énergie pour le soleil et puits d'énergie pour le ciel et l'air). Une partie des besoins de chauffage ou de rafraîchissement est couverte par le soleil ou les deux puits respectivement : cette partie est appelée potentiel exploité et se calcule très simplement pour chaque ressource.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.3.3.1.1 Potentiel exploité du soleil

Les besoins de chauffage sans soleil étant supérieurs au besoins de chauffage avec soleil (figure 3.14), on calcule le potentiel exploité du soleil pour les besoins de chauffage comme la différence des besoins de chauffage sans soleil (besoins réels) et des besoins de chauffage avec soleil (besoins résiduels) (équation 3.22).

$$pexp_{C,s}(t) = b_{C-s}(t) - b_C(t) \tag{3.22}$$

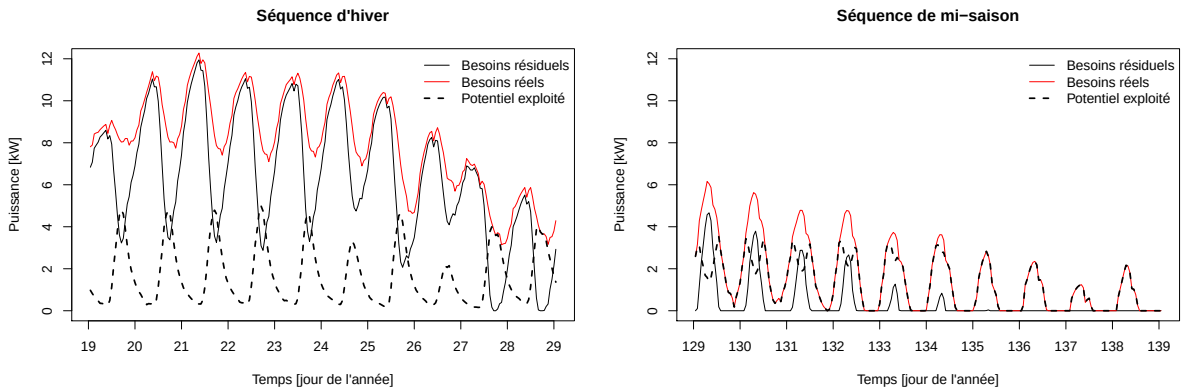

FIGURE 3.14 – Potentiel exploité du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite)

Le potentiel exploité du soleil étant la différence entre les besoins de chauffage réels et résiduels (figure 3.14), l'allure du potentiel exploité pourra être semblable à celle des besoins. Suivant le climat et la configuration de bâtiment, le potentiel exploité pourra être amorti et déphasé par rapport aux besoins et au potentiel. Une analyse dynamique de ces indicateurs pourra nous permettre par exemple de rechercher les corrélations entre eux et d'esquisser les caractéristiques d'un éventuel système de stockage. On vérifie sur cette figure que lorsque les courbes des besoins réels et du potentiel exploité se superposent, alors les besoins résiduels s'annulent (fin de la séquence de mi-saison à droite).

3.3.3.1.2 Potentiel exploité du ciel

On a vu que les besoins de rafraichissement sans ciel étaient plus importants que les besoins de rafraîchissement avec ciel (figure 3.15). Cela signifie que le ciel est un puits d'énergie dont une partie est exploitée par le bâtiment. Le potentiel du ciel exploité par le bâtiment pour les besoins de rafraichissement est donc égal à la différence entre les besoins de rafraîchissement sans ciel et avec ciel à chaque instant (équation 3.23).

$$pexp_{R,c}(t) = b_{R-c}(t) - b_R(t) \tag{3.23}$$

L'évolution du potentiel exploité du ciel sur deux séquences de dix jours est présentée sur la figure 3.15. Cette figure montre que lorsque les besoins réels et résiduels sont semblables, le potentiel exploité est assez faible. De plus, lorsque les besoins réels sont nuls, le potentiel exploité s'annule également : la ressource ne peut pas être utilisée pour diminuer un besoin déjà nul.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

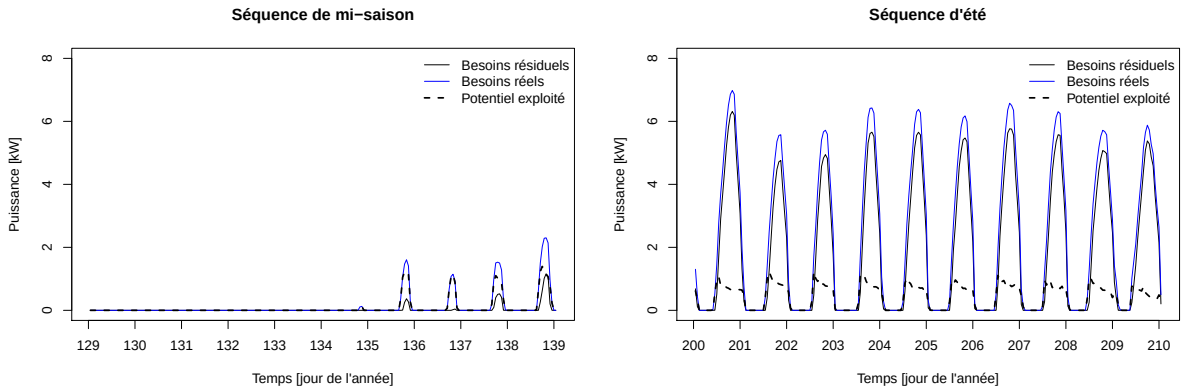

FIGURE 3.15 – Potentiel exploité du ciel pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite)

3.3.3.1.3 Potentiel exploité de l'air

De même, les besoins de rafraîchissement sont plus élevés dans la simulation sans air que dans la simulation avec air (figure 3.16), ce qui signifie que le bâtiment exploite une partie du potentiel de l'air pour couvrir ses besoins. Le potentiel de l'air exploité par le bâtiment est égal à la différence des besoins de rafraîchissement sans air et avec air (équation 3.24).

$$pexp_{R,a}(t) = b_{R-a}(t) - b_R(t) \tag{3.24}$$

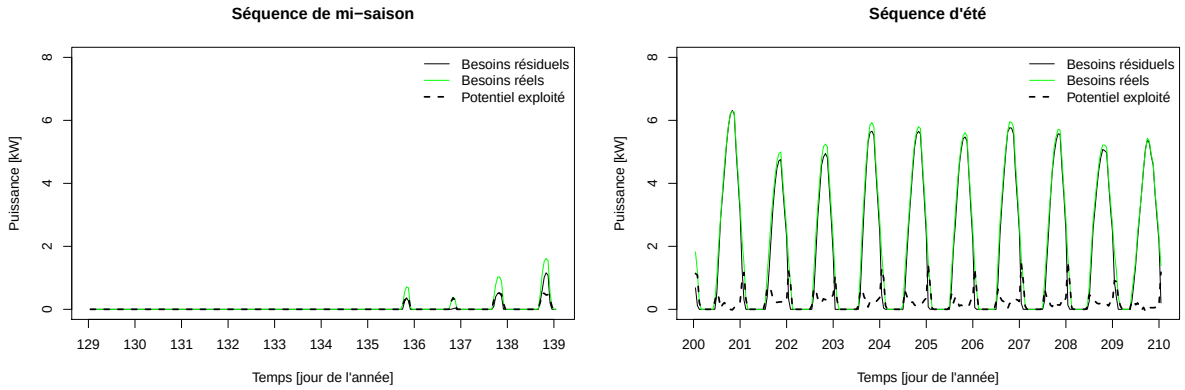

FIGURE 3.16 – Potentiel exploité de l'air pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (mi-saison à gauche et été à droite)

La figure 3.16 présentant le potentiel exploité de l'air montre également le lien entre faible différence des besoins réels et résiduels et faible valeur du potentiel exploité. Elle montre également l'intérêt d'une analyse dynamique permettant de savoir si le potentiel exploité est plutôt en phase avec les besoins (et le potentiel) ou pas.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.3.3.2 Taux de couverture des besoins par une ressource

A partir du potentiel exploité des différentes ressources, intégré sur une période donnée, on peut calculer le taux de couverture des besoins de chauffage par le soleil et le taux de couverture des besoins de rafraîchissement par le ciel et l'air sur cette période.

$$\tau couv_{C,s} = \frac{Pexp_{C,s}}{B_{C-s}} \tag{3.25}$$

$$\tau couv_{R,c} = \frac{Pexp_{R,c}}{B_{R-c}} \tag{3.26}$$

$$\tau couv_{R,a} = \frac{Pexp_{R,a}}{B_{R-a}} \tag{3.27}$$

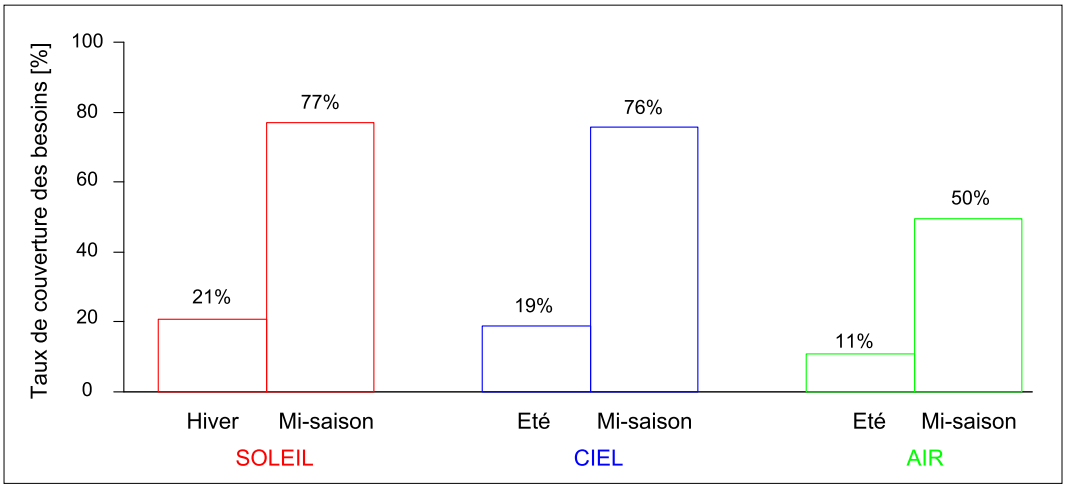

FIGURE 3.17 – Taux de couverture des besoins par les trois ressources (soleil, ciel et air) pour une maison individuelle non isolée sur plusieurs séquences de l'année

La figure 3.17 illustre la notion de taux de couverture des besoins pour les trois ressources. On y représente en effet, les valeurs du taux de couverture des besoins réels de chauffage par le soleil, ainsi que les valeurs du taux de couverture des besoins réels de rafraîchissement par le ciel et l'air, dans le cas d'une maison individuelle non isolée à Trappes, et ce pour deux périodes différentes pour chaque ressource. Un taux de couverture proche de 100% indiquera que la ressource couvre entièrement les besoins réels, et que les besoins résiduels sont nuls. La somme des taux de couvertures de deux ressources couvrant le même type de besoins (comme le ciel et l'air pour les besoins de rafraîchissement) n'est pas nécessairement inférieure à 100% car les besoins utilisés pour le calcul sont les besoins réels pour chaque ressource, et les ressources soustraites, les simulations étant différentes, les besoins sont donc différents.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.3.3.3 Taux d'exploitation d'une ressource

On calcule également le taux d'exploitation du soleil pour les besoins de chauffage, et du ciel et de l'air pour les besoins de rafraîchissement sur une période donnée :

$$\tau exp_{C,s} = \frac{Pexp_{C,s}}{Pconc_{C,s}} \tag{3.28}$$

$$\tau exp_{R,c} = \frac{Pexp_{R,c}}{Pconc_{R,c}} \tag{3.29}$$

$$\tau exp_{R,a} = \frac{Pexp_{R,a}}{Pconc_{R,a}} \tag{3.30}$$

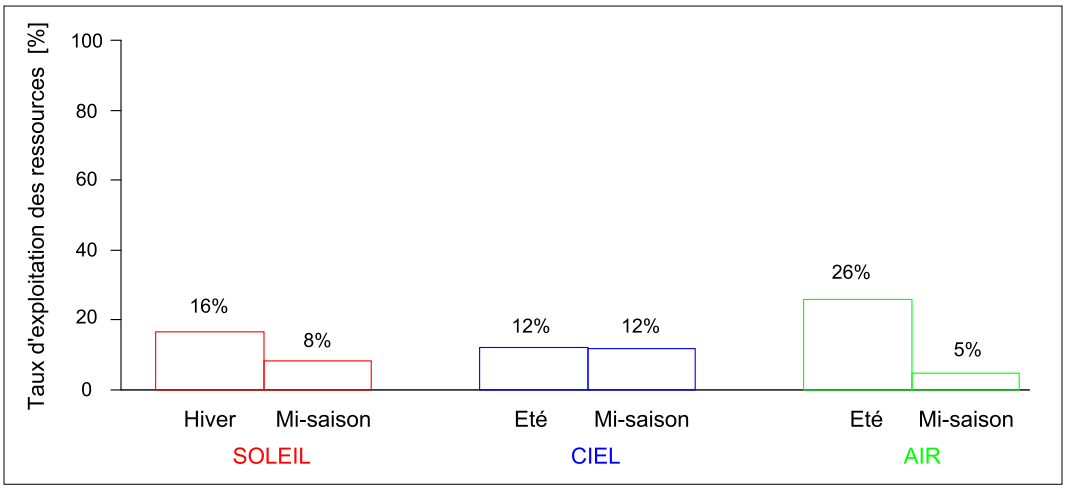

FIGURE 3.18 – Taux d'exploitation des trois ressources (soleil, ciel et air) pour une maison individuelle non isolée sur plusieurs séquences de l'année

Sur la figure 3.18, on a représenté les valeurs des taux d'exploitation des trois ressources pour plusieurs périodes de l'année dans le cas d'une maison non isolée à Trappes. Plus le taux d'exploitation est élevé plus la ressource est effectivement utilisée par le bâtiment pour couvrir ses besoins. Ainsi, des faibles taux d'exploitation indiqueront qu'une grande marge de manoeuvre est possible dans l'amélioration de la performance bioclimatique des bâtiments.

3.3.4 Indicateurs de contre-performance

Chacune des ressources considérées dans cette étude est également susceptible d'avoir un impact négatif sur le bâtiment en générant des besoins (potentiel exploité négatif). Dans une démarche globale d'évaluation de la performance d'un bâtiment vis-à-vis des ressources qui l'entourent, il est nécessaire de prendre en compte cet aspect en calculant les besoins générés par chaque ressource.

3.3.4.1 Besoin généré

3.3.4.1.1 Besoin généré par le soleil

Si l'on applique le calcul du potentiel exploité du soleil aux besoins de rafraîchissement, on obtient une valeur négative. L'opposé de ce potentiel « exploité » est alors appelé besoin généré et il est calculé

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

pour le soleil de la manière suivante (équation 3.31) :

$$bgen_{R,s}(t) = b_R(t) - b_{R-s}(t) \tag{3.31}$$

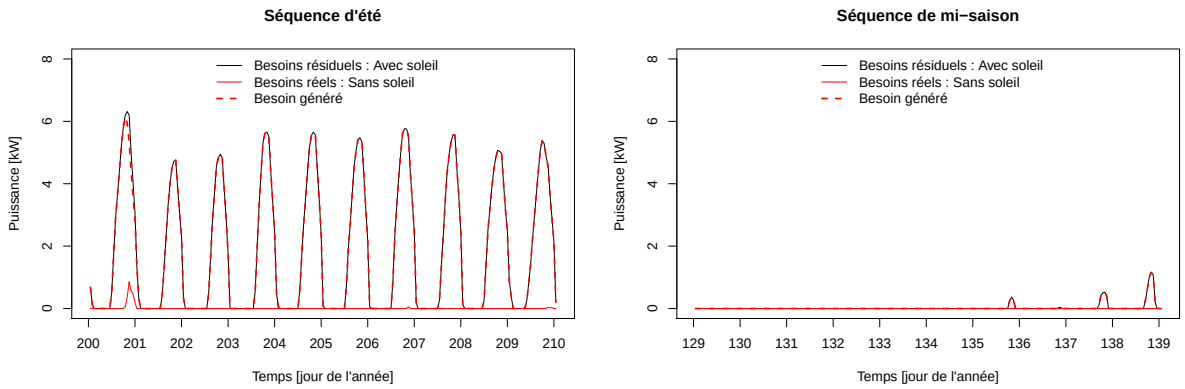

FIGURE 3.19 – Besoins de rafraîchissement avec et sans soleil et besoin généré par le soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (été à gauche et mi-saison à droite)

La figure 3.19 représente l'évolution du besoin généré par le soleil sur deux séquences temporelles. On constate que quelle que soit la période de l'année, les courbes du besoin généré et du besoin de rafraîchissement résiduels sont superposées : ainsi le besoin de rafraîchissement est dans cet exemple généré entièrement par le soleil.

3.3.4.1.2 Besoin généré par le ciel

De même, les besoins de chauffage avec ciel étant supérieurs à ceux de la simulation sans ciel, le ciel génère des besoins de chauffage et le calcul de ce besoin généré est donné par l'équation 3.32

$$bgen_{C,c}(t) = b_C(t) - b_{C-c}(t) \tag{3.32}$$

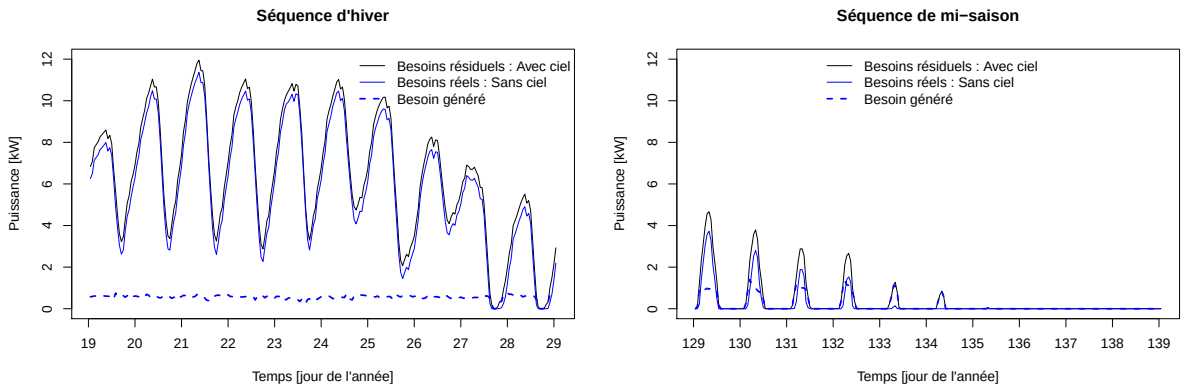

FIGURE 3.20 – Besoins de chauffage avec et sans ciel et besoin de chauffage généré par le ciel pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite)

Sur la figure 3.20 on a représenté l'évolution du besoin de chauffage généré par le ciel pour deux périodes différentes. On peut voir qu'en hiver le besoin de chauffage généré par le ciel est très faible mais relativement constant car les courbes des besoins réels et résiduels sont légèrement décalées. Lorsque les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

besoins de chauffage s'annulent, on vérifie bien sur cette figure que le besoin généré s'annule également (en mi-saison à droite).

3.3.4.1.3 Besoin généré par l'air

Les besoins de chauffage avec air sont supérieurs aux besoins de chauffage sans air. L'air extérieur génère donc des besoins de chauffage qu'on peut calculer de la manière suivante (équation 3.33)

$$bgen_{C,a}(t) = b_C(t) - b_{C-a}(t) \tag{3.33}$$

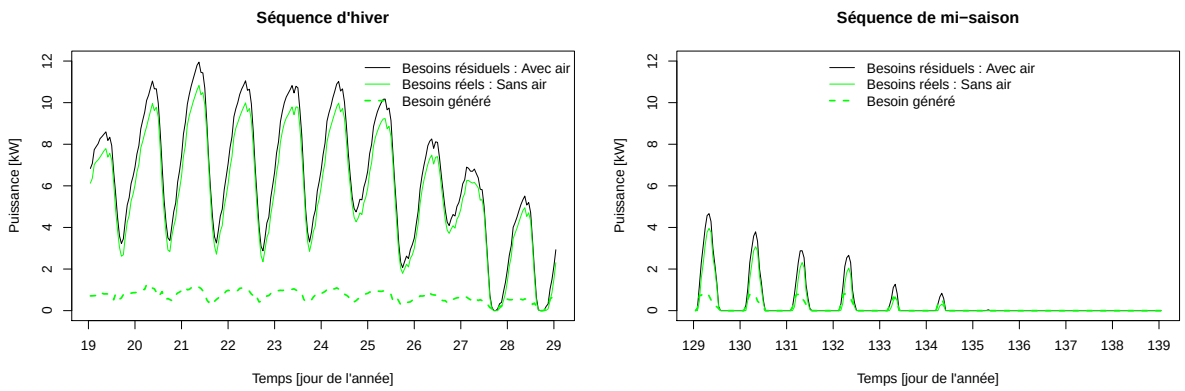

FIGURE 3.21 – Besoins de chauffage avec et sans air et besoin de chauffage généré par l'air pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences de l'année (hiver à gauche et mi-saison à droite)

L'évolution du besoin de chauffage généré par l'air sur deux séquences (hiver est mi-saison) est représentée sur la figure 3.21. On constate que les courbes des besoins réels et résiduels sont décalées sur l'axe des ordonnées, et que ce décalage est maximum lors des pics de besoin. Les besoins générés ne sont donc pas tout à fait constants et leurs maxima locaux sont en phase avec ceux des besoins. On vérifie encore sur cette figure que des besoins nuls correspondent à un besoin généré nul.

3.3.4.2 Taux de génération des besoins par une ressource

Comme on calcule un taux de couverture des besoins de chauffage par le soleil, et de rafraîchissement par le ciel ou l'air, on peut calculer un taux de génération des besoins de rafraîchissement par le soleil et des besoins de chauffage par le ciel ou l'air :

$$\tau gen_{R,s} = \frac{Bgen_{R,s}(t)}{B_R} \tag{3.34}$$

$$\tau gen_{C,c} = \frac{Bgen_{C,c}}{B_C} \tag{3.35}$$

$$\tau gen_{C,a} = \frac{Bgen_{C,a}}{B_C} \tag{3.36}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

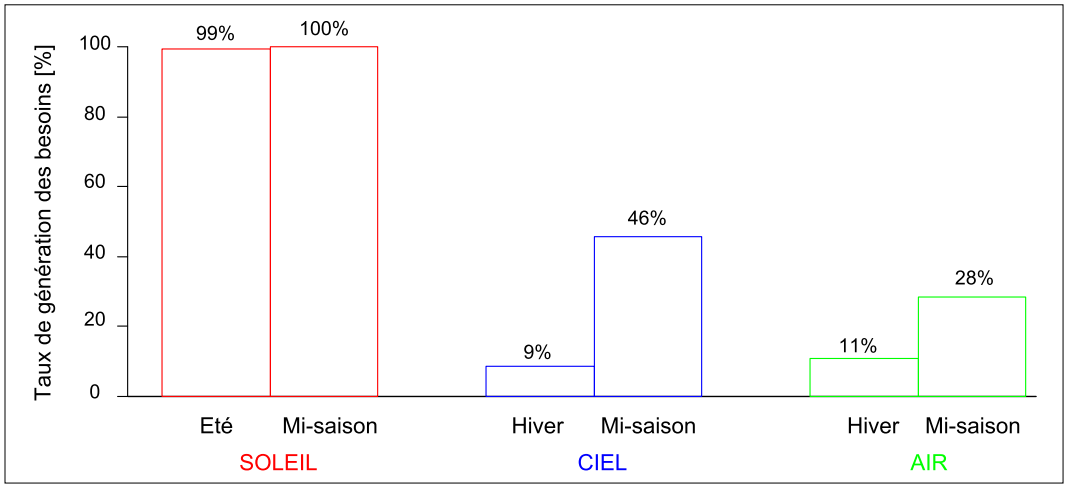

FIGURE 3.22 – Taux de génération des besoins par les trois ressources (soleil, ciel et air) pour une maison individuelle non isolée sur plusieurs séquences de l'année

La figure 3.22 illustre la notion de taux de génération des besoins par les trois ressources. On y a représenté les valeurs du taux de génération des besoins résiduels de rafraîchissement par le soleil, ainsi que les valeurs du taux de génération des besoins résiduels de chauffage par le ciel et l'air, dans le cas d'une maison individuelle non isolée à Trappes, et ce pour deux périodes différentes pour chaque ressource. Un taux de génération des besoins proche de 100% (comme ici pour le soleil sur les deux périodes) indiquera que tous les besoins en question sont générés par la ressource et que la performance bioclimatique du bâtiment pourra être améliorée (en se protégeant contre le rayonnement solaire en été par exemple). Cet indicateur pourra être utile pour comparer deux solutions bioclimatiques qui ont des taux de performance bioclimatique (taux d'exploitation et taux de couverture) élevés. On peut noter que la somme des taux de génération des besoins de deux ressources qui génèrent le même type de besoins (comme ici le ciel et l'air) est inférieure à 100% car leur dénominateur, les besoins résiduels, est commun. Si cette somme est strictement inférieure à 100%, alors une partie des besoins est générée par une autre cause.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.4 Indicateurs au niveau des parois

Parmi les trois ressources étudiées, deux sont définies par des échanges radiatifs entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement (le soleil et le ciel). Les indicateurs peuvent donc être calculés, non seulement pour le bâtiment tout entier mais également au niveau de chaque paroi.

3.4.1 Indicateurs de besoin

Le besoin d'une paroi n'est pas défini. Le calcul des indicateurs de potentiel et de performance d'une paroi sera basé sur la concomitance avec les besoins de la zone en contact avec la paroi.

3.4.2 Indicateurs de potentiel

3.4.2.1 Potentiel total d'une ressource sur une paroi

3.4.2.1.1 Potentiel total du soleil

Comme pour le bâtiment tout entier, le potentiel total du soleil sur une paroi est la somme des flux direct et diffus incidents sur la paroi.

$$ptot_{s_p}(t) = (Dir(t) + Dif(t))S_p \tag{3.37}$$

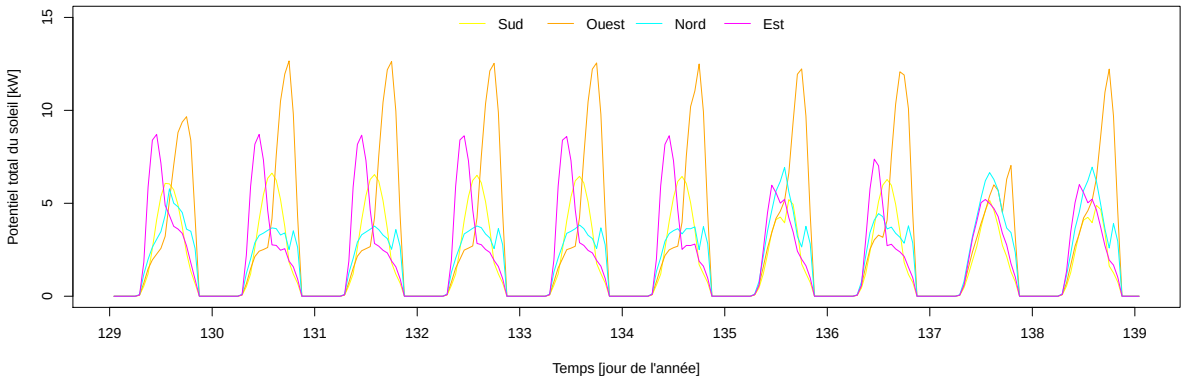

FIGURE 3.23 – Potentiel total du soleil sur les murs d'une maison individuelle selon leur orientation en mi-saison

La figure 3.23 montre l'évolution du potentiel total du soleil sur les quatre murs d'une maison individuelle en mi-saison à Marseille. Selon l'orientation, la courbe du potentiel total n'a pas la même allure à cause de l'évolution du rayonnement direct au cours de la journée. Le nord, qui ne voit que le rayonnement diffus, présente le même potentiel que l'est l'après-midi, et l'ouest le matin.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.4.2.1.2 Potentiel total du ciel

Au niveau de chaque paroi, le potentiel total du ciel est égal au flux radiatif en grandes longueurs d'onde échangé entre la paroi et le ciel. Il est calculé de la manière suivante.

$$ptot_{c_p}(t) = F\varepsilon_p\sigma(T_p^4(t) - T_a^4(t))S_p \tag{3.38}$$

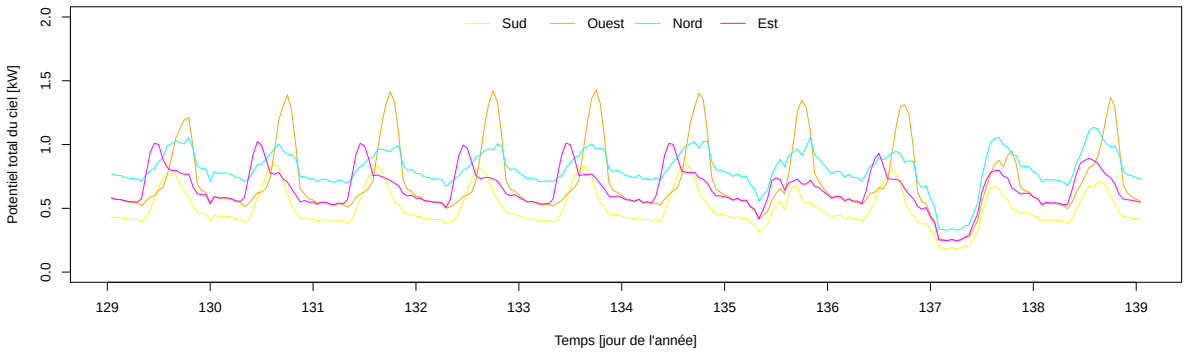

FIGURE 3.24 – Potentiel total du ciel sur les murs d'une maison individuelle selon leur orientation en été

La figure 3.24 montre l'évolution du potentiel total du ciel sur les quatre murs d'une maison individuelle en mi-saison à Marseille. Comme le potentiel total d'une paroi dépend de sa température de surface, l'allure du potentiel total est différente selon l'orientation de la paroi.

3.4.2.2 Potentiel concomitant d'une ressource sur une paroi

3.4.2.2.1 Potentiel concomitant du soleil

Le potentiel concomitant du soleil sur une paroi est égal au potentiel total du soleil sur cette paroi si les besoins de chauffage réels de la zone délimitée par la paroi existent, sinon le potentiel concomitant est nul.

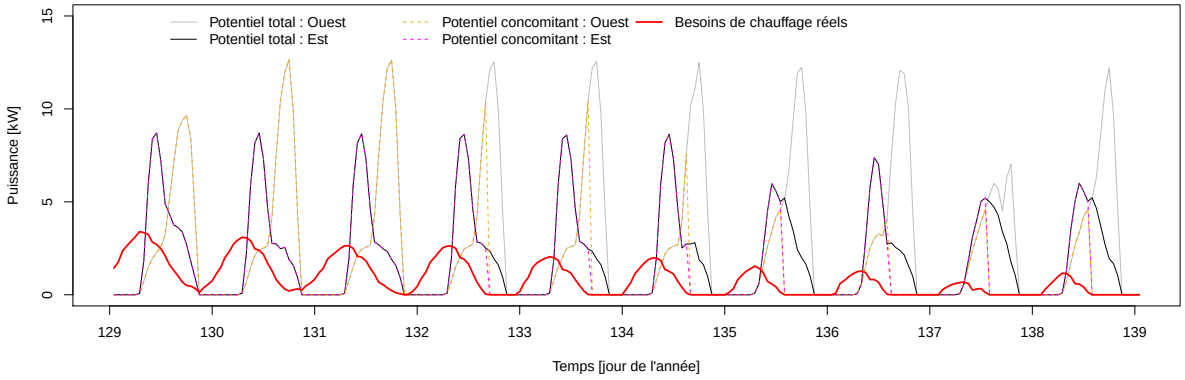

FIGURE 3.25 – Potentiel total et concomitant du soleil sur les murs d'une maison individuelle selon leur orientation (est et ouest) et besoins de chauffage réels (sans soleil) de la zone en mi-saison

Sur la figure 3.25, on a représenté l'évolution du potentiel total du soleil sur deux murs (est et ouest) en trait plein, et en trait pointillé l'évolution du potentiel concomitant du soleil sur ces deux mêmes parois. Il est intéressant de constater que les besoins de chauffage réels peuvent être en phase avec le

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

potentiel total du soleil sur une orientation donnée, ce qui implique que le potentiel concomitant du soleil sur cette orientation sera proche du potentiel total (ici à l'est). Au contraire, pour d'autres orientations, ces besoins seront décalés par rapport au potentiel total du soleil et l'intégrale du potentiel concomitant sur la période concernée sera beaucoup plus faible que celle du potentiel total (ici à l'ouest).

3.4.2.2.2 Potentiel concomitant du ciel

Le potentiel concomitant du ciel sur une paroi est égal au potentiel total du ciel sur cette paroi si les besoins de rafraîchissement réels de la zone délimitée par la paroi existent, sinon le potentiel concomitant est nul.

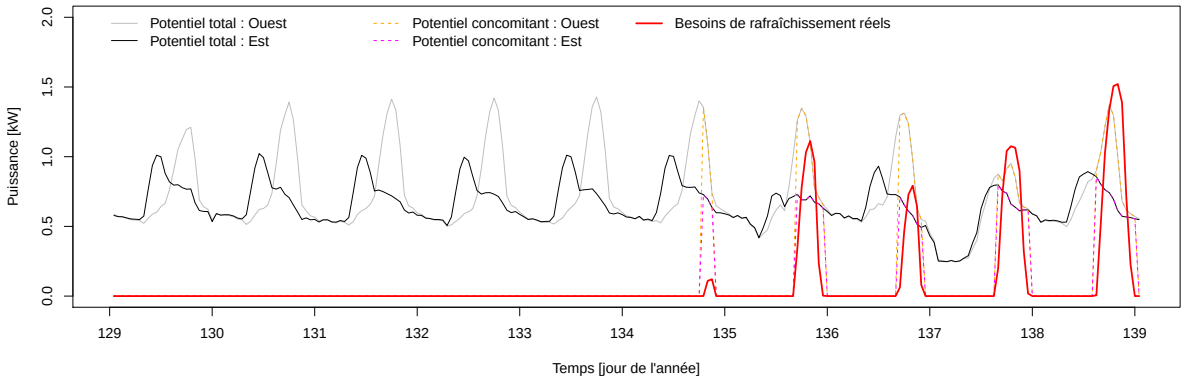

FIGURE 3.26 – Potentiel total et concomitant du ciel sur les murs d'une maison individuelle selon leur orientation (Est et Ouest) et besoins de rafraîchissement réels (sans ciel) de la zone en mi-saison

Sur la figure 3.26, l'évolution du potentiel total du ciel sur deux orientations (est et ouest) est représentée en trait plein, et l'évolution du potentiel concomitant du soleil sur ces deux mêmes parois est tracée en pointillés. On constate que si le potentiel total du ciel sur les parois est toujours positif, le potentiel concomitant, qui dépend des besoins de rafraîchissement de la zone, est intermittent, et l'allure de la courbe le représentant est différente selon l'orientation de la paroi.

3.4.3 Indicateurs de performance au niveau d'une paroi

3.4.3.1 Potentiel exploité d'une ressource au niveau d'une paroi

La définition du potentiel exploité d'une ressource par le bâtiment tout entier est assez intuitive : c'est la différence entre les besoins de ce bâtiment dans un environnement sans la ressource et les besoins de ce bâtiment dans un environnement complet. Au niveau d'une paroi, la notion de besoin n'a plus de sens. Pour définir le potentiel exploité d'une ressource par une paroi, on va utiliser la notion de « flux utile » entre une paroi et la zone du bâtiment en contact avec cette paroi : à chaque instant, entre la paroi et la zone, s'établit un flux énergétique. Si le besoin de la zone, dans la simulation sans la ressource (besoin réel), est non nul à cet instant, ce flux constitue une partie du besoin. Au même instant, mais dans la simulation avec la ressource, ce flux paroi-zone est modifié, et un nouveau besoin, cette fois-ci avec ressource (besoin résiduel), est calculé. La différence entre les flux paroi-zone, à chaque instant où le besoin sans ressource existe, dans les simulations avec et sans ressource, nous donne la contribution de la paroi à la réduction du besoin de la zone : c'est donc le potentiel de la ressource exploité par la paroi. Dans la suite, nous préciserons le calcul de ce flux pour le soleil et le ciel.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.4.3.1.1 Potentiel solaire exploité par une paroi

Pour calculer le potentiel solaire exploité par une paroi, on doit préalablement calculer le flux énergétique, entre la paroi et la zone, qui contribue au besoin de chauffage, et ce dans les simulations avec et sans soleil.

Dans la simulation sans soleil ce flux est noté $\phi_{C-s}(t)$ et il est égal à :

$$\phi_{C-s}(t) = \begin{cases} h_{int}(T_{int-s}(t) - T_{p-s}(t)) & \text{si} \quad b_{C-s}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.39}$$

Dans la simulation complète, avec toutes les ressources, il faut également prendre en compte le flux solaire directement transmis par la paroi I_{trans} si c'est une fenêtre. Le flux paroi-zone, défini si les besoins réels existent, est égal à :

$$\phi_{C}(t) = \begin{cases} h_{int}(T_{int}(t) - T_{p}(t)) - I_{trans}(t) & \text{si} \quad b_{C-s}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.40}$$

Le potentiel solaire exploité par la paroi pour réduire les besoins de chauffage est alors défini à chaque instant comme la différence entre ces deux flux.

$$pexp_{C,s}(t) = \phi_{C-s}(t) - \phi_{C}(t) \tag{3.41}$$

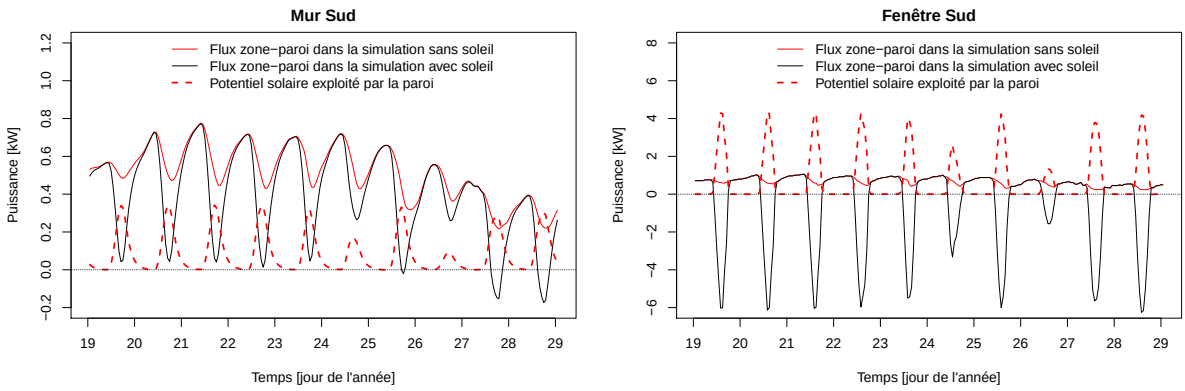

FIGURE 3.27 – Potentiel solaire exploité par deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite)

Sur la figure 3.27, on a représenté l'évolution du potentiel solaire exploité par deux types de parois : un mur et une fenêtre. On constate que, dans les deux cas, le flux énergétique entre la zone et la paroi peut être positif (il l'est pratiquement toujours pour les murs et pendant la nuit pour les fenêtres) : la paroi perd de l'énergie, et c'est la raison pour laquelle les besoins de chauffage ne sont pas nuls. Ce flux zone-paroi dans la simulation avec soleil est toujours inférieur au flux zone-paroi dans la simulation sans soleil, ce qui permet de calculer le potentiel exploité. Cette différence est beaucoup plus importante pour la fenêtre que pour le mur (une différence d'un ordre de grandeur dans cet exemple) à cause du flux solaire directement transmis par la fenêtre.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.4.3.1.2 Potentiel du ciel exploité par une paroi

De manière similaire, on calcule le potentiel exploité du ciel par une paroi pour les besoins de rafraîchissement comme la différence entre le flux paroi-zone contribuant à ces besoins dans la simulation avec et sans ciel. Ce flux est uniquement calculé lorsque les besoins de rafraîchissement sans ciel ne sont pas nuls.

Dans la simulation sans ciel, le flux qui contribue aux besoins de rafraîchissement réels est noté $\phi_{R-c}(t)$ et il est égal à :

$$\phi_{R-c}(t) = \begin{cases} h_{int}(T_{p-c}(t) - T_{int-c}(t)) + I_{trans}(t) & \text{si} \quad b_{R-c}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.42}$$

Dans la simulation avec ciel, ce flux est égal à :

$$\phi_{R}(t) = \begin{cases} h_{int}(T_{p}(t) - T_{int}(t)) + I_{trans}(t) & \text{si} \quad b_{R-c}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.43}$$

On calcule alors le potentiel du ciel exploité par la paroi pour diminuer les besoins de rafraîchissement à chaque instant en faisant la différence entre ces deux flux :

$$pexp_{R,c}(t) = \phi_{R-c}(t) - \phi_{R}(t) \tag{3.44}$$

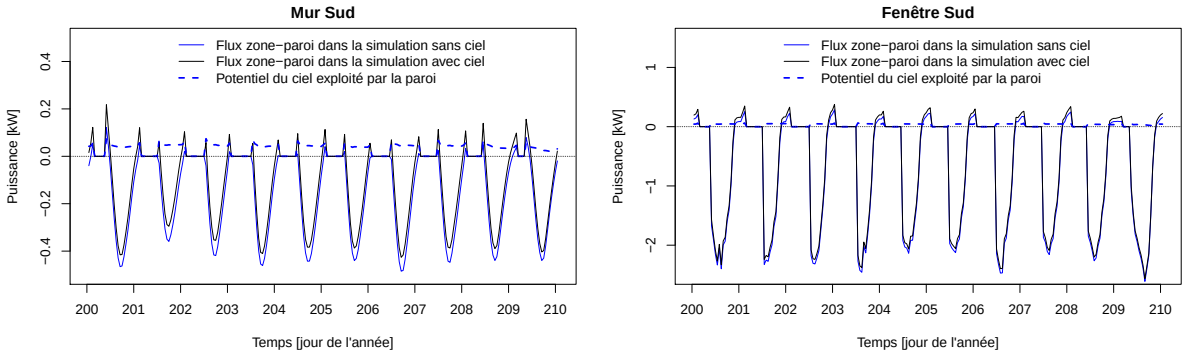

FIGURE 3.28 – Potentiel du ciel exploité par deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite)

La figure 3.28 montre l'évolution sur une séquence d'été du potentiel du ciel exploité par deux types de parois : un mur et une fenêtre. Sur cette figure sont représentés les flux énergétiques entre la paroi et la zone. La plupart du temps, durant la journée, ce flux est positif : on a un gain d'énergie à cause du soleil, et c'est ce qui cause les besoins de rafraîchissement. Même lorsque ce flux est négatif (perte d'énergie par la paroi), la différence entre ses valeurs dans la simulation sans ciel et avec ciel est positive : la paroi exploite le potentiel du ciel. On peut remarquer que les flux entre la paroi et la zone n'ont pas la même valeur pour le mur et la fenêtre à cause de la contribution du rayonnement solaire transmis par la fenêtre. Cependant, le potentiel du ciel exploité par les deux types de parois est sensiblement égal.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.4.3.2 Taux de couverture des besoins de la zone par une paroi

De la même manière qu'on a défini, pour le bâtiment tout entier, le taux de couverture des besoins par les ressources, on peut définir le taux de couverture des besoins d'une zone par une paroi de cette zone à l'aide des ressources. Il suffit pour cela de calculer le rapport entre le potentiel exploité de la ressource par la paroi et les besoins réels de la zone.

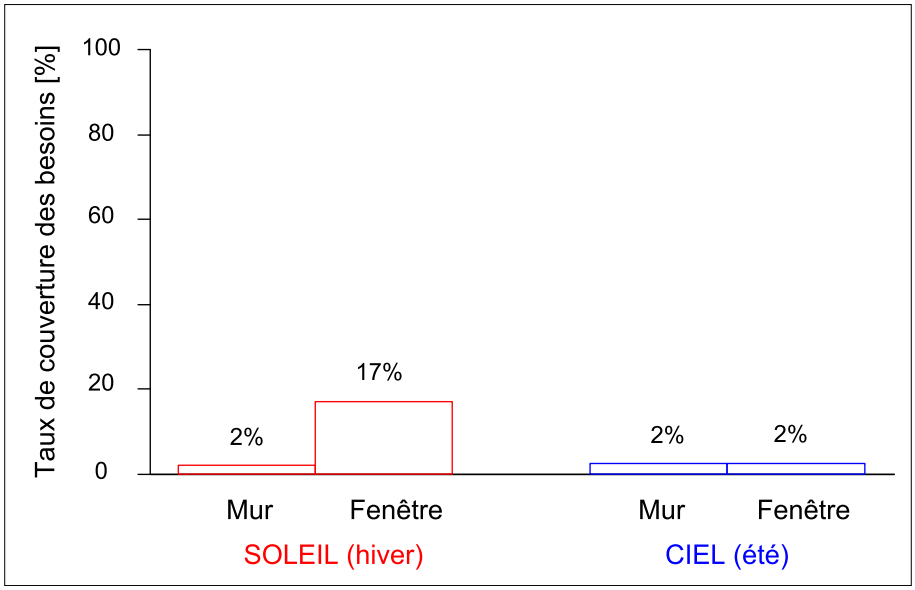

FIGURE 3.29 – Taux de couverture des besoins au niveau de deux types de parois (mur et fenêtre) par le soleil et le ciel

La figure 3.29 présente les taux de couverture des besoins de chauffage par le soleil en hiver, ainsi que le taux de couverture des besoins de rafraîchissement en été au niveau de deux types de parois (mur et fenêtre). Un taux de couverture faible signifie que les besoins de la zone sont très peu couverts par la ressource grâce à la paroi en question.

3.4.3.3 Taux d'exploitation des ressources par une paroi

De même on peut définir le taux d'exploitation d'une ressource par une paroi par le rapport entre le potentiel exploité par la paroi et le potentiel concomitant de la ressource sur la paroi. Cette définition est donc la même que pour le bâtiment tout entier.

Sur la figure 3.30, on peut voir les taux d'exploitation du soleil et du ciel par deux types de parois. Cette figure tend à montrer qu'une fenêtre aura un meilleur taux d'exploitation des ressources qu'un mur.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

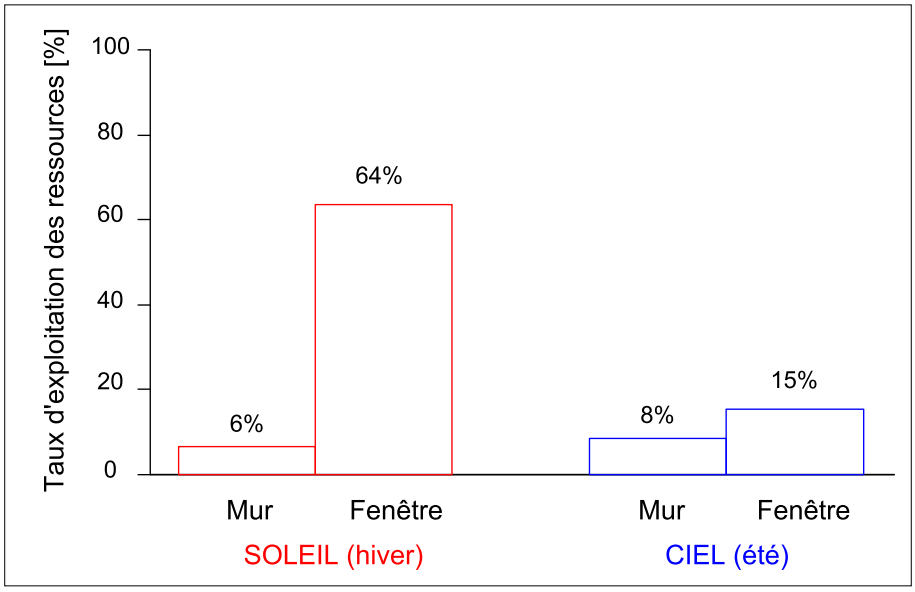

FIGURE 3.30 – Taux d'exploitation du soleil et du ciel par deux types de parois (mur et fenêtre)

3.4.4 Indicateurs de contre-performance d'une paroi

3.4.4.1 Besoins générés au niveau d'une paroi par une ressource

De la même manière que pour le potentiel exploité par une paroi, on peut définir le besoin généré par une ressource au niveau d'une paroi. Pour plus de clarté, on explicitera son calcul pour chacune des ressources : soleil et ciel.

3.4.4.1.1 Besoins de rafraîchissement générés par le soleil au niveau d'une paroi

Pour le bâtiment tout entier, on définit assez simplement les besoins de rafraîchissement générés par le soleil comme la différence entre les besoins de rafraîchissement dans la simulation avec soleil et les besoins de rafraîchissement dans la simulation sans soleil. Le besoin d'une paroi n'étant pas défini, le calcul des besoins de rafraîchissement générés au niveau d'une paroi par le soleil doit être adapté. On calcule tout d'abord le flux entre la paroi et la zone qui contribue au besoin de rafraîchissement dans la simulation avec soleil : c'est le flux énergétique entre la paroi et la zone, seulement défini si les besoins de rafraîchissement résiduels (avec soleil) ne s'annulent pas. Ce flux est égal à :

$$\phi_R(t) = \begin{cases} h_{int}(T_p(t) - T_{int}(t)) + I_{trans}(t) & \text{si} \quad b_R(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.45}$$

On calcule également ce flux, aux mêmes instants (besoins de rafraîchissement résiduels non nuls), mais dans la simulation sans soleil. Ce flux est égal à :

$$\phi_{R-s}(t) = \begin{cases} h_{int}(T_{p-s}(t) - T_{int-s}(t)) & \text{si} \quad b_R(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.46}$$

Le besoin de rafraîchissement généré par le soleil au niveau de la paroi est alors défini à chaque

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

instant comme la différence entre le flux contribuant au besoin de rafraîchissement dans les simulations avec et sans soleil :

$$bgen_{R,s}(t) = \phi_R(t) - \phi_{R-s}(t) \tag{3.47}$$

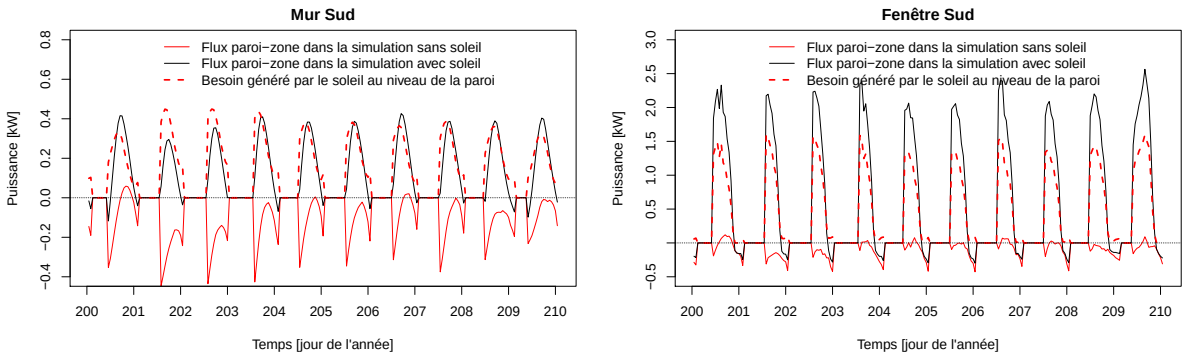

FIGURE 3.31 – Besoin de rafraîchissement généré par le soleil au niveau de deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite)

Sur la figure 3.31, on a représenté l'évolution du besoin de rafraîchissement généré par le soleil au niveau de deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite). Dans les deux cas, le flux entre la paroi et la zone dans la simulation avec soleil est positif pendant la journée : c'est ce qui cause les besoins de rafraîchissement résiduels. Dans la simulation sans soleil, ce flux est plus faible et peut même devenir négatif. La différence entre les deux nous donne bien le besoin de rafraîchissement généré au niveau de la paroi par le soleil. On peut remarquer que ce flux est beaucoup plus important pour la fenêtre que pour le mur, à cause du flux solaire directement transmis.

3.4.4.1.2 Besoins de chauffage générés par le ciel au niveau d'une paroi

De manière similaire, on calcule le besoin de chauffage généré par le ciel au niveau d'une paroi comme la différence entre le flux zone-paroi qui contribue à l'augmentation du besoin de chauffage entre la simulation sans et avec ciel. Ce flux est uniquement calculé lorsque le besoin de chauffage résiduel (avec ciel) existe.

Il est égal, dans la simulation sans ciel à :

$$\phi_{C-c}(t) = \begin{cases} h_{int}(T_{int-c}(t) - T_{p-c}(t)) - I_{trans}(t) & \text{si} \quad b_C(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.48}$$

Dans la simulation avec ciel, il est donné par :

$$\phi_C(t) = \begin{cases} h_{int}(T_{int}(t) - T_p(t)) - I_{trans}(t) & \text{si} \quad b_C(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.49}$$

On calcule alors le besoin de chauffage généré par le ciel au niveau de la paroi à chaque instant en faisant la différence entre ces deux flux :

$$bgen_{C,c}(t) = \phi_C(t) - \phi_{C-c}(t) \tag{3.50}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

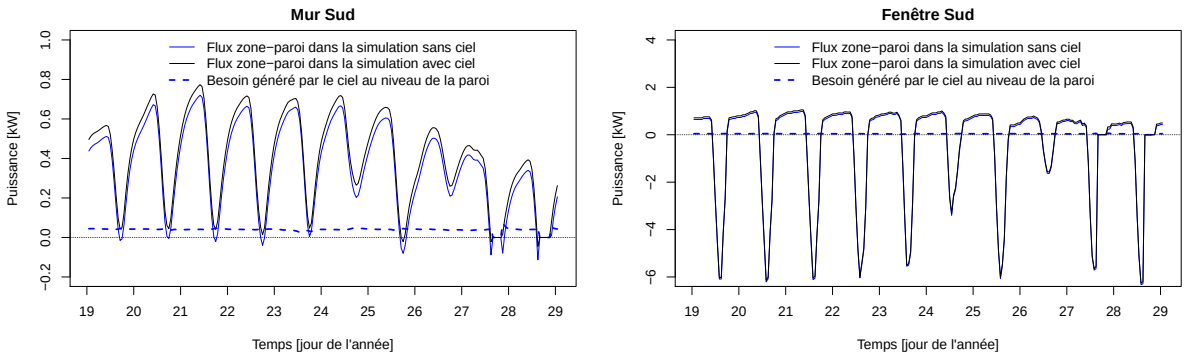

FIGURE 3.32 – Besoin de chauffage généré par le ciel au niveau de deux types de parois : un mur (à gauche) et une fenêtre (à droite)

La figure 3.32 montre l'évolution du besoin de chauffage généré par le ciel par deux types de parois (mur et fenêtre) sur une séquence d'hiver. Sur cette figure, on a représenté les flux énergétiques entre la zone et la paroi dans les simulations avec et sans ciel. On constate que ce flux est toujours plus important dans la simulation avec ciel que dans la simulation sans ciel : les parois perdent plus d'énergie lorsqu'elles échangent par rayonnement avec le ciel. Dans les deux cas, le besoin généré par le ciel est relativement constant.

3.4.4.2 Taux de génération des besoins de la zone par une paroi

A partir du besoin généré par une ressource au niveau d'une paroi, on peut définir, comme pour le bâtiment tout entier, le taux de génération des besoins de la zone par la ressource au niveau d'une paroi. C'est simplement le rapport entre le besoin généré au niveau de la paroi et les besoins résiduels de la zone. Cet indicateur doit nous permettre de savoir dans quelle mesure chaque paroi génère les besoins de la zone.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Chapitre 4

Application à des bâtiments types : analyse des résultats

La méthode d'analyse du comportement thermique des bâtiments présentée au chapitre précédent a été développée pour mettre en évidence l'impact des différentes ressources énergétiques de l'environnement : soleil, ciel et air. Cette méthode peut être appliquée au cas particulier d'une maison individuelle : la maison INCAS de l'INES (Institut National de l'Energie Solaire) à Chambéry. Afin d'observer l'impact de l'isolation sur les performances bioclimatiques, deux niveaux d'isolation différents ont été appliqués. La maison est ensuite simulée à l'aide du logiciel CLIM2000 dans deux climats différents (Marseille et Trappes). Les indicateurs détaillés au chapitre précédent sont alors calculés non seulement pour le bâtiment entier mais aussi à l'échelle des parois, le but étant de comprendre la contribution de chacun des composants d'enveloppe au fonctionnement thermique du bâtiment, notamment en termes d'exploitation des différentes ressources.

Pour cela, les indicateurs sont tout d'abord intégrés sur une année entière et analysés de manière globale à l'échelle du bâtiment entier ainsi qu'à l'échelle des parois. Cependant, au niveau des parois, le nombre de résultats obtenus est très important, et pour pouvoir les analyser de manière exhaustive et objective, une méthode d'analyse de données multidimensionnelles est utilisée : l'Analyse en Composantes Principales. Cette analyse permettra notamment de décrire les corrélations entre les différents indicateurs, ce qui révèlera le comportement des parois vis-à-vis du potentiel des ressources.

Enfin, l'analyse globale ne permettant pas de visualiser les évolutions dynamiques, une analyse temporelle est nécessaire afin de mieux comprendre les phénomènes inertiels et de stockage d'énergie dans le bâtiment. Cette analyse doit également permettre de préciser les contours des besoins de stockage d'énergie à court-terme pour une exploitation optimale des ressources de l'environnement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.1 Description du cas d'étude

Le bâtiment utilisé pour mettre en œuvre la nouvelle méthode d'analyse est la maison individuelle INCAS de l'INES à Chambéry. Ce bâtiment a été choisi notamment parce qu'il est bien connu de la communauté française de modélisateurs et que des tests de comparaison et de calage de modèles ont été réalisés. C'est donc un bâtiment pour lequel la modélisation énergétique peut être considérée comme fiable. D'autre part, la maison INCAS est complètement instrumentée, ce qui implique que les résultats des modèles numériques pourront à terme être comparés aux mesures in situ.

L'un des enjeux de notre méthode est de pouvoir apprécier l'impact de l'isolation sur les caractéristiques bioclimatiques d'un bâtiment. Pour cette raison, deux versions de la maison INCAS ont été modélisées : une maison BBC (notée« bbc »), conforme aux exigences du label BBC Effinergie, et une maison sans isolation ni ventilation double-flux, typique des maisons construites avant la toute première réglementation thermique de 1974 (notée « av74 »). Les hypothèses retenues pour la maison BBC sont, à peu de choses près, celles retenues dans la comparaison inter-logiciels réalisée en 2009 à l'INES et qui correspondent aux caractéristiques de la première maison de la plateforme INCAS ([Brun *et al.*, 2009]).

Le logiciel utilisé pour la modélisation et la simulation de la maison INCAS dans les deux versions est le logiciel CLIM2000 ([Rongère *et al.*, 1993]), développé à EDF R&D et dont les équations se basent sur l'analogie thermique-électrique.

4.1.1 Modèle de bâtiment

4.1.1.1 Description du bâtiment

FIGURE 4.1 – Maison INCAS de l'INES à Chambéry

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.1.1.1.1 Géométrie

Le modèle adopté est constitué de deux zones indépendantes du point de vue aéraulique, chaque zone correspondant à un niveau de la maison INCAS (rez-de-chaussée et étage). On considère que la maison est fondée sur un vide sanitaire et qu'elle est surmontée de combles ventilés non modélisés. Par conséquent les planchers bas et haut sont traités de la même manière : leur surface extérieure échange par convection et rayonnement en grandes longueurs d'onde avec une zone d'air à la température extérieure, mais ne reçoit pas de flux solaire.

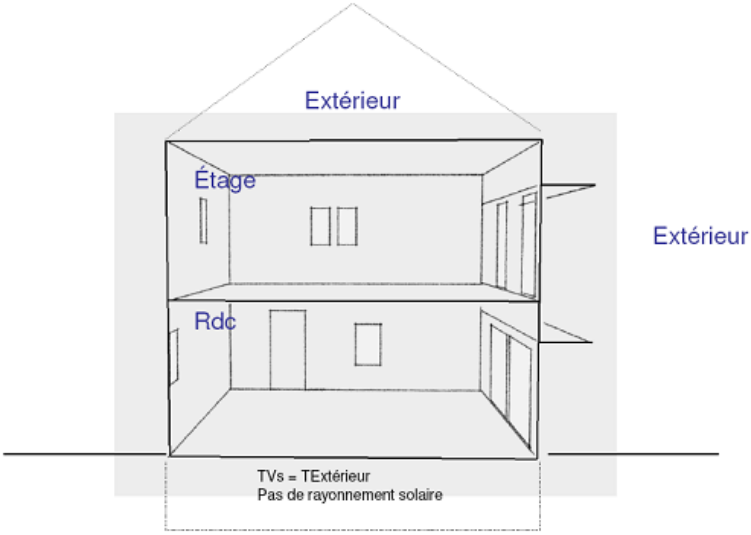

FIGURE 4.2 – Modélisation bi-zone de la maison INCAS avec vide sanitaire et combles

4.1.1.1.2 Ponts thermiques

La prise en compte des ponts thermiques est réalisée en considérant des surfaces de déperditions majorées. La surface périphérique du dallage intermédiaire est intégrée aux surfaces déperditives.

4.1.1.1.3 Échanges convectifs

La volonté d'homogénéiser les hypothèses entre différents outils utilisés dans le cadre du projet VALERIE a conduit à considérer certaines simplifications. Parmi celles-ci, on a considéré comme constants les coefficients convectifs des surfaces extérieures et intérieures de toutes les parois (vitrées et opaques). Ils sont précisés dans le tableau 4.1.

Type de paroi	Position dans le bâtiment	Coefficient convectif [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
Paroi verticales	Surfaces extérieures	14.9
	Surfaces intérieures	3.29
Parois horizontales	Planchers	1.78
	Plafonds	4.59
	Vide sanitaire	3.33
	Combles	18.9

TABLE 4.1 – Coefficients convectifs

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.1.1.2 Parois opaques

4.1.1.2.1 Composition des parois

Les compositions des parois pour les deux versions de la maison INCAS (type BBC et version d'avant 1974) sont répertoriées dans les tableaux 4.2 et 4.3 (composition de l'extérieur vers l'intérieur).

Type de paroi	Matériau	Épaisseur [cm]	Conductivité [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Masse volumique [$kg \cdot m^{-3}$]	Chaleur spécifique [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
Mur extérieur	Blocs bétons	15	0.74	800	648
	Laine de verre	20	0.035	12	840
	Blocs bétons	15	0.74	800	648
Plancher bas	Polystyrène extrudé	25	0.029	15	880
	Hourdis	16	1.23	1300	648
	Béton lourd	4	1.75	2400	880
Plancher haut	Laine de verre	40	0.035	12	840
	Plaque de plâtre	1.3	0.32	850	799
Plancher intermédiaire	Béton plein	22	1.75	2400	880

TABLE 4.2 – Caractéristiques des parois opaques de la maison BBC

Type de paroi	Matériau	Épaisseur [cm]	Conductivité [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Masse volumique [$kg \cdot m^{-3}$]	Chaleur spécifique [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
Mur extérieur	Enduit extérieur	2	1.15	1700	1000
	Blocs bétons	15	0.74	800	648
Plancher bas	Hourdis	16	1.23	1300	648
Plancher haut	Bois léger	16	0.15	500	1200
Plancher intermédiaire	Béton plein	22	1.75	2400	880

TABLE 4.3 – Caractéristiques des parois opaques de la maison avant 1974

4.1.1.2.2 Rayonnement des parois

L'émissivité en grandes longueurs d'onde (GLO) des surfaces extérieures des parois est égale à 0.90. Les échanges radiatifs aux surfaces intérieures sont pris en compte à travers un coefficient global égal à $5\,W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.1.1.3 Parois vitrées

4.1.1.3.1 Caractéristiques optiques

Les vitrages de la maison en versions d'avant 1974 sont des simples-vitrages dont les coefficients radiatifs sont donnés dans le tableau 4.4. Les vitrages de la maison en version BBC sont des doubles-vitrages peu émissifs constitués de deux simples-vitrages identiques à ceux de la maison d'avant 1974 (la face externe du vitrage intérieur étant revêtue d'une couche à faible émissivité) séparés par de l'argon (configuration 6/16/6). Les coefficients radiatifs en courtes longueurs d'onde (CLO) globaux de ces doubles-vitrages ont été calculés à partir des formules données par la norme AFNOR EN410 ([NFE, 1999]) et sont présentés dans le tableau 4.4.

Rayonnement	Paramètre	Doubles-vitrages BBC	Simples-vitrages avant 1974
Diffus	Transmittivité τ_{Dif}	0.468	0.784
	Absorptivité α_{Dif}	0.330	0.145
Direct	Transmittivité τ_{Dir}	$\tau_{Dif} * \cos(\theta_i)$	
	Absorptivité α_{Dir}	α_{Dif}	

TABLE 4.4 – Coefficients optiques des parois vitrées

4.1.1.3.2 Caractéristiques thermiques

Le coefficient de transmission thermique équivalent de l'ensemble cadre + vitrage est égal à $1.3\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}}$ pour les fenêtres doubles-vitrages de la maison en version BBC et à $5.0\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}}$ pour les fenêtres simples-vitrages de la maison en version d'avant 1974.

4.1.2 Ventilation et système de chauffage/rafraîchissement

Le renouvellement d'air est assuré par ventilation mécanique. Dans les deux cas, on considère un taux de renouvellement d'air de base égal à $0.5\,\mathrm{vol{\cdot}h^{-1}}$. De plus, la récupération de chaleur est assurée par une ventilation double-flux (d'un rendement de 0.75) dans la maison BBC entre novembre et mars. Dans les deux cas, une surventilation nocturne est mise en place entre 22h et 7h en été (juin, juillet et août) avec un taux de renouvellement d'air égal à $4\,\mathrm{vol{\cdot}h^{-1}}$. Le confort thermique est assuré dans chacune des deux zones par un générateur de puissance idéal qui gère à la fois le chauffage (température de consigne de chauffage $T_C = 19$°C) et le rafraîchissement (température de consigne de rafraîchissement $T_R = 26$°C).

4.1.3 Scénario d'occupation

Le scénario d'occupation correspond à une famille de quatre personnes, ayant une activité extérieure tous les jours de la semaine. On suppose donc que deux personnes sont présentes entre 17 et 18h, et que quatre personnes sont présentes entre 18 et 8h. On considère un dégagement sensible de $80\,\mathrm{W}$ par personne. De plus, un scénario d'utilisation d'appareils ménagers est utilisé et résumé dans le tableau suivant (tableau 4.5).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Heures	0-6	7	8	9-17	18-19	20	21	22	23	24
Puissance [W]	20	510	410	20	410	630	710	510	490	20

TABLE 4.5 – Scénario quotidien de puissance dissipée par les appareils électroménagers

Ainsi, le scénario de puissance totale dissipée à la fois par les habitants et les appareils électroménagers est donné dans le tableau 4.6.

Heures	0-6	7	8	9-16	17	18-19	20	21	22	23	24
Puissance [W]	340	830	730	20	570	730	950	1030	830	810	340

TABLE 4.6 – Scénario quotidien de la puissance totale dissipée

4.1.4 Météos

Le bâtiment est simulé dans deux climats français représentatifs des zones climatiques H1 et H3 : Trappes (noté « Tr ») et Marseille (noté « Ma »). Le climat de Trappes est caractérisé par un été plutôt frais (moyenne des températures estivales entre 15 et 20°C) et un hiver froid (moyenne des températures comprise entre 0 et 5°C). Le climat de Marseille est un climat méditerranéen caractérisé par un été chaud (moyenne des températures comprise entre 20 et 25°C) et un hiver doux (moyenne des températures entre 5 et 10°C). L'écart des températures moyennes entre Marseille et Trappes reste constant tout au long de l'année autour de 5°C. Les fichiers météorologiques utilisés en entrée des simulations sont les fichiers METEONORM.

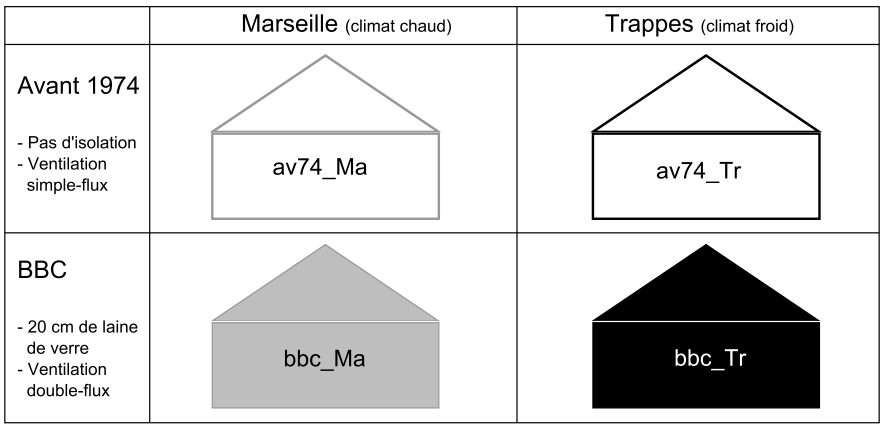

FIGURE 4.3 – Synthèse des quatre cas testés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.2 Analyse globale des résultats

Une fois que les différents cas définis précédemment ont été simulés, on calcule les valeurs, intégrées sur l'année, des indicateurs introduits dans le chapitre précédent pour chaque bâtiment et au niveau des parois verticales. Pour plus de clarté, les résultats sont ensuite rapportés à la surface habitable de la maison INCAS ($97.5\,\mathrm{m}^2$). Ils sont présentés dans les tableaux 4.7, 4.8 et 4.9.

	BBC		Avant 1974	
	Marseille	Trappes	Marseille	Trappes
Potentiel concomitant	632	695	799	880
Potentiel ajusté	13	30	111	177
Besoin réel	25	61	283	470
Besoin résiduel	0	17	185	362
Potentiel exploité	24	43	98	108
Taux de couverture	99%	71%	35%	23%
Taux d'exploitation	4%	6%	12%	12%
Besoin généré	31	4	32	3
Taux de génération	100%	100%	98%	100%

TABLE 4.7 – Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour le soleil (en $\mathrm{kWh/(m^2{\cdot}an)}$)

	BBC		Avant 1974	
	Marseille	Trappes	Marseille	Trappes
Potentiel concomitant	205	29	79	9
Potentiel ajusté	35	4	40	3
Besoin réel	35	4	42	4
Besoin résiduel	32	4	32	3
Potentiel exploité	4	1	10	1
Taux de couverture	11%	17%	23%	32%
Taux d'exploitation	2%	3%	12%	13%
Besoin généré	0	2	24	23
Taux de génération	30%	10%	13%	6%

TABLE 4.8 – Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour le ciel (en $\mathrm{kWh/(m^2{\cdot}an)}$)

	BBC		Avant 1974	
	Marseille	Trappes	Marseille	Trappes
Potentiel concomitant	500	410	32	9
Potentiel ajusté	47	32	10	2
Besoin réel	62	34	37	4
Besoin résiduel	32	4	32	3
Potentiel exploité	30	30	5	1
Taux de couverture	49%	90%	14%	33%
Taux d'exploitation	6%	7%	16%	13%
Besoin généré	0	9	24	50
Taux de génération	65%	53%	13%	14%

TABLE 4.9 – Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour l'air (en $\mathrm{kWh/(m^2{\cdot}an)}$)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.2.1 Différence entre le potentiel des ressources et les besoins des bâtiments

L'analyse de la valeur des indicateurs intégrée sur toute l'année peut tout d'abord nous permettre de comparer les besoins du bâtiment au potentiel des ressources. Deux types de comparaison peuvent être réalisés :

- Une comparaison entre potentiel concomitant des ressources et besoins réels du bâtiment, ce qui nous donne la marge bioclimatique des ressources par rapport aux besoins du bâtiment.
- Une comparaison entre potentiel ajusté des ressources et besoins réels du bâtiment, ce qui nous permet de voir si les besoins réels peuvent être couverts à chaque instant par les ressources.

La figure 4.4 montre la différence entre le potentiel (concomitant et ajusté) et les besoins réels de la maison INCAS dans les deux versions (BBC et avant 1974) et les deux météos (Marseille et Trappes), et ce pour les trois ressources (soleil, ciel et air). Pour le soleil on calcule d'une part la différence entre le potentiel concomitant et les besoins de chauffage réels (sans soleil), et d'autre part la différence entre le potentiel ajusté et ces mêmes besoins. Pour le ciel et l'air on calcule d'une part la différence entre le potentiel concomitant de chacune des sources et les besoins de rafraîchissement réels (sans ciel et sans air respectivement) et d'autre part la différence entre le potentiel ajusté de chacune des ressources et ces mêmes besoins. Les potentiels concomitant et ajusté et les besoins réels sont ici intégrés sur toute l'année et divisés par la surface habitable de la maison INCAS pour une meilleure visualisation des résultats.

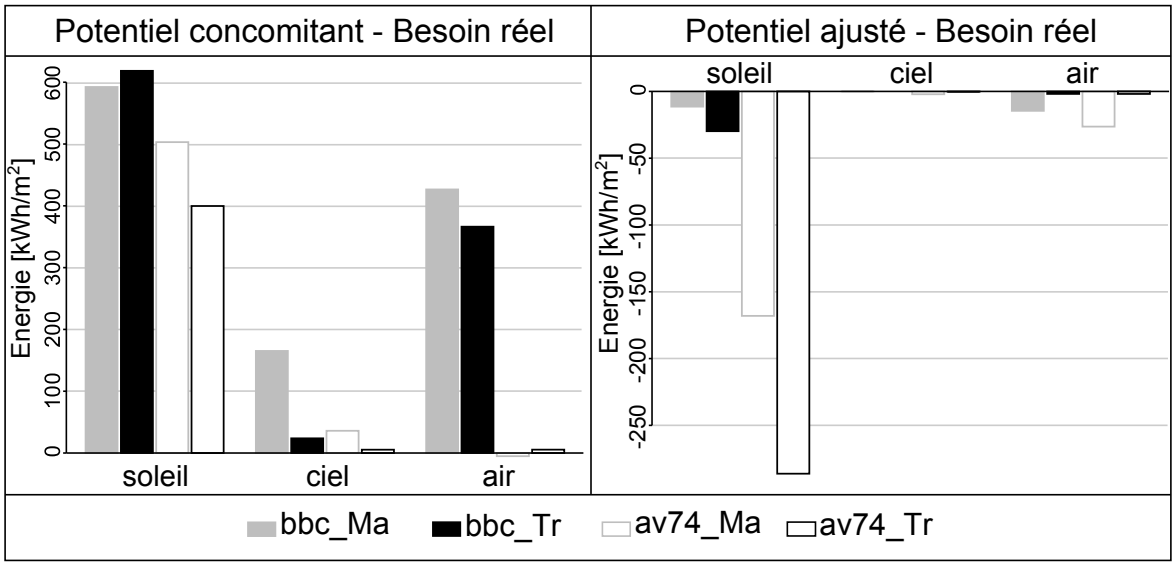

FIGURE 4.4 – Différence entre le potentiel des ressources et les besoins réels associés (chauffage pour le soleil et rafraîchissement pour le ciel et l'air) sur une année

4.2.1.1 Commentaire sur le potentiel concomitant

Sur la figure 4.4 (à gauche), on constate que dans tous les cas (sources, niveaux d'isolation et météos), la différence entre le potentiel concomitant et les besoins réels est positive. Ainsi, en valeur intégrée sur toute l'année, le potentiel concomitant des ressources est supérieur aux besoins. Cette tendance est plus importante pour les bâtiments BBC que pour les bâtiments d'avant 1974. Selon la nature du besoin, l'explication de cette tendance diffère.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

En effet, en ce qui concerne le besoin de chauffage, le passage d'une configuration d'avant 1974 à une configuration BBC (isolation + ventilation double-flux) diminue de façon très importante les besoins de chauffage, ce qui diminue automatiquement le potentiel concomitant, mais dans une moindre mesure. Ainsi la différence entre les apports solaires et les besoins de chauffage augmente en passant d'un bâtiment non isolé à un bâtiment très isolé. Par la suite on verra que la marge entre le potentiel et le besoin (la marge bioclimatique) s'amplifie avec l'isolation mais que cette évolution se tasse rapidement.

En ce qui concerne les besoins de rafraîchissement, l'explication est d'une autre nature. Pour un même climat, le passage d'un bâtiment non isolé à un bâtiment BBC génère une augmentation très importante du potentiel du ciel et de l'air, alors qu'il a un impact plus modéré sur le besoin de rafraîchissement. Ainsi, l'isolation augmente la marge bioclimatique du potentiel de rafraîchissement du ciel et de l'air.

4.2.1.2 Commentaires sur le potentiel ajusté

Le constat précédent, bien qu'apparemment positif, peut masquer des déséquilibres entre apports et besoins selon la période de l'année. Pour repérer ces déséquilibres, il est utile de comparer les besoins sans source au potentiel ajusté, qui est limité à chaque instant par la quantité d'énergie dont le bâtiment a besoin pour satisfaire les critères de confort. La Figure 4.4 (à droite) présente ces résultats et l'on constate que cette fois la tendance s'inverse : le potentiel ajusté est, en valeur intégrée sur l'année, inférieur aux besoins sans source. Cela est particulièrement marquant dans le cas du soleil, pour les bâtiments d'avant 1974 dont les besoins de chauffage sont tellement importants, que les périodes durant lesquelles ils ne peuvent être couverts par le potentiel solaire sont nombreuses. Dans les autres cas, cette différence est plus restreinte et elle est même nulle dans le cas du ciel pour toutes les configurations et dans celui de l'air à Trappes. Cela signifie que dans ces cas précis (ciel et air à Trappes) les besoins de rafraîchissement peuvent être couverts à chaque instant par les ressources de l'environnement.

4.2.1.3 Commentaires sur le potentiel concomitant du soleil sur des périodes plus courtes

Au vu des résultats précédents, montrant que le potentiel du soleil ne permet pas de couvrir les besoins de chauffage à chaque instant, on s'attache donc plus particulièrement à détailler le cas du soleil avec des périodes d'intégration plus courtes. En effet, si le potentiel concomitant du soleil intégré sur toute l'année est supérieur aux besoins de chauffage réels alors que le potentiel ajusté leur est inférieur, cela signifie que le potentiel concomitant du soleil est en excès durant certaines périodes et en déficit à d'autre moment. Pour mieux apprécier ces périodes, on compare donc le potentiel concomitant du soleil aux besoins de chauffage sur des périodes plus courtes.

En restreignant la période d'intégration au niveau du mois ou de la semaine (figure 4.5), on constate que le potentiel concomitant reste supérieur aux besoins de chauffage réels dans toutes les configurations, excepté dans le cas du bâtiment d'avant 1974 à Trappes pendant les mois d'hiver (janvier, février, novembre et décembre). On peut s'intéresser à l'allure des courbes mensuelles, qui illustre les trois périodes classiques du comportement d'un bâtiment en climat tempéré. En hiver les besoins sont importants, et les apports solaires sont faibles à cause d'une part des courtes journées, et d'autre part du faible ensoleillement : la différence entre apports et besoins est donc faible, voire négative dans certains cas. En mi-saison (printemps et automne), les apports solaires augmentent alors que les besoins diminuent et donc la différence entre les deux augmente. En été, les besoins réels sont principalement présents la nuit

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

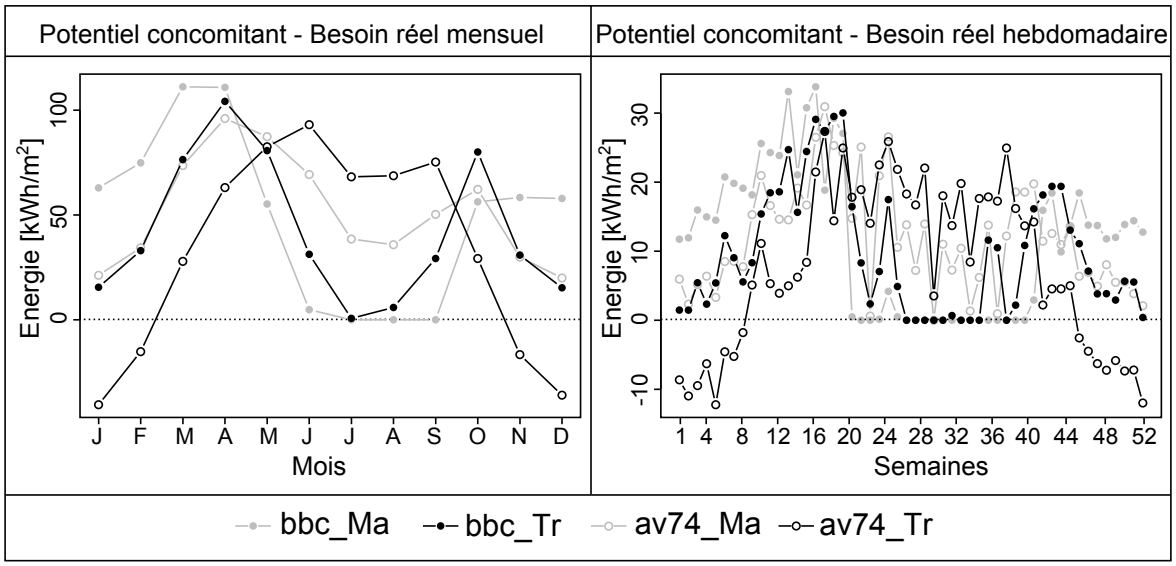

FIGURE 4.5 – Différence entre le potentiel solaire concomitant et les besoins de chauffage réels pour chaque mois (à gauche) et chaque semaine (à droite)

et dans la matinée alors que les apports solaires sont nuls ou faibles, la différence entre les deux a donc tendance à diminuer à nouveau.

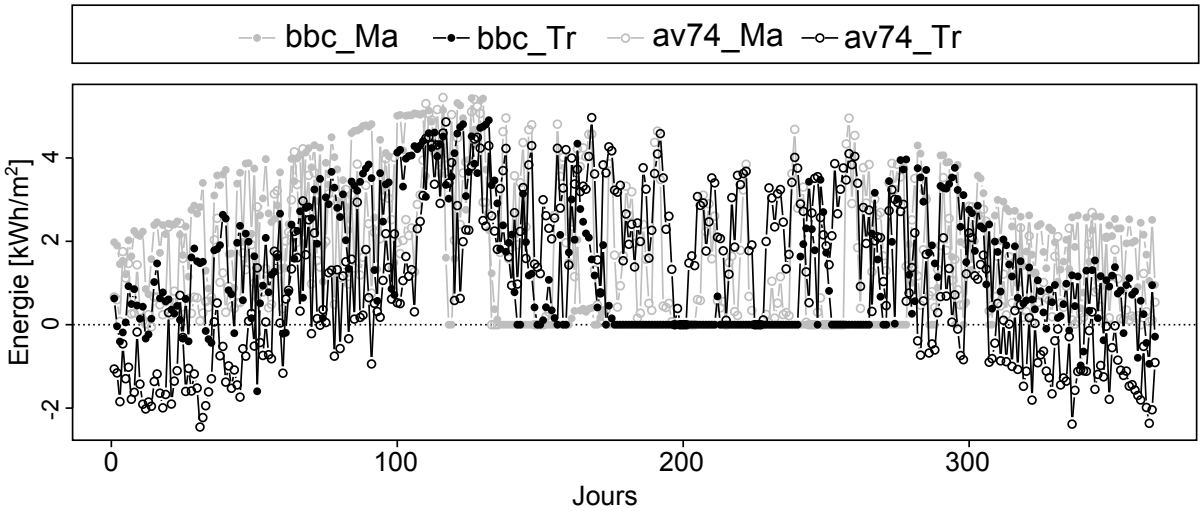

FIGURE 4.6 – Différence entre le potentiel solaire concomitant et les besoins de chauffage réels quotidiens

À l'échelle de chaque journée, les conclusions sont un peu différentes (figure 4.6). En effet, l'écart entre le potentiel concomitant et les besoins réels quotidiens reste positif tout au long de l'année à Marseille, mais il peut être parfois négatif à Trappes en hiver y compris pour le bâtiment BBC, ce qui n'était pas le cas pour des périodes plus longues où le potentiel concomitant hebdomadaire et mensuel était supérieur aux besoins de chauffage sur la même période. Une analyse dynamique menée plus loin permettra de préciser cette situation et de proposer des aménagements techniques pour s'y adapter.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.2.1.4 Potentiel concomitant sur chacune des parois

Une analyse globale à l'échelle des parois peut également être proposée afin de comprendre le lien entre potentiel concomitant et enveloppe du bâtiment. À cette échelle, seules deux ressources subsistent : le soleil et le ciel. De plus, le potentiel ajusté n'a pas été défini au niveau des parois : on s'attachera donc simplement à analyser le comportement des parois par rapport au potentiel concomitant du soleil et du ciel.

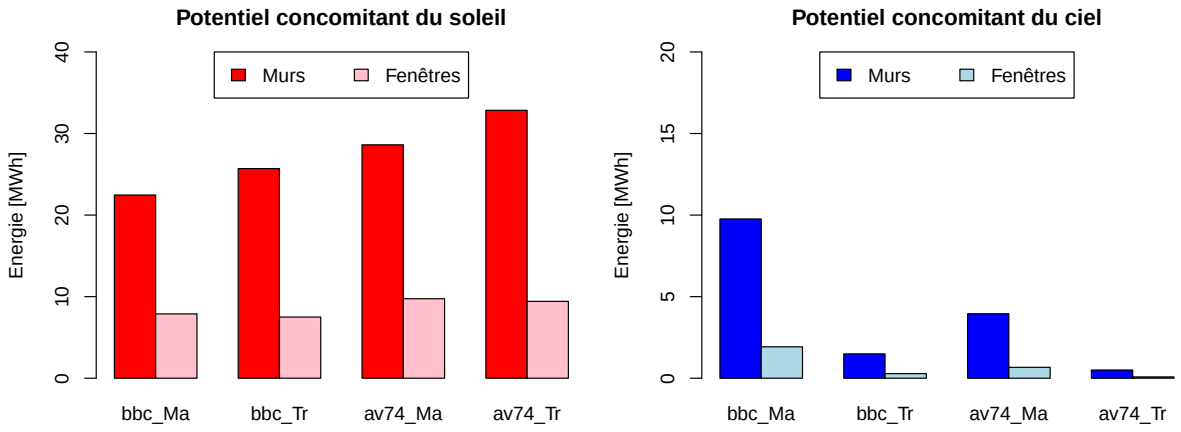

FIGURE 4.7 – Potentiel concomitant annuel du soleil et du ciel sur les murs et les fenêtres dans les différentes configurations de la maison INCAS

La figure 4.7 présente le potentiel concomitant du soleil (à gauche) et du ciel (à droite) dans chaque configuration de bâtiment sur l'ensemble des murs et l'ensemble des fenêtres. Étant donné que la majorité de l'enveloppe est constituée de parois opaques, le potentiel concomitant du soleil et du ciel est plus important sur les murs que sur les fenêtres.

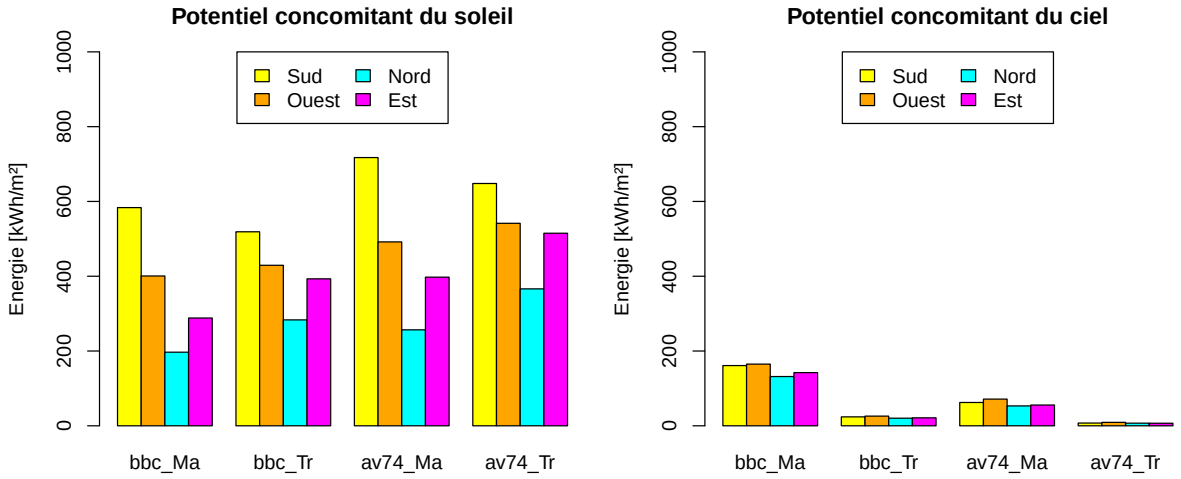

FIGURE 4.8 – Potentiel concomitant annuel du soleil et du ciel en fonction de l'orientation des parois de la maison INCAS

On peut également comparer les valeurs surfaciques (cette fois-ci par unité de surface de paroi) du potentiel concomitant en fonction des différentes orientations (murs et fenêtres confondus). La figure 4.8 présente ces résultats. On constate que l'orientation a une influence sur le potentiel concomitant du soleil

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

(dans l'ordre décroissant : sud, ouest, est et nord). En revanche, l'orientation des parois impacte peu leur potentiel concomitant vis-à-vis du ciel, même si l'on constate que l'ouest est toujours privilégié. L'une des raisons expliquant ce phénomène est l'existence de besoins de rafraîchissement en fin de journée l'été, lorsque les surfaces exposées à l'ouest reçoivent le plus de rayonnement solaire et sont les plus chaudes. Ce sont donc celles qui ont le plus grand potentiel de rafraîchissement.

4.2.2 Mesure de la performance bioclimatique des bâtiments

Les indicateurs de performance présentés au chapitre précédent nous permettent d'évaluer le comportement du bâtiment par rapport aux ressources de l'environnement. Pour comparer la performance bioclimatique d'un bâtiment dans plusieurs configurations, on utilise plutôt les indicateurs relatifs qui rapportent le potentiel exploité d'une ressource, soit au potentiel concomitant de cette ressource (taux d'exploitation de la ressource), soit aux besoins réels du bâtiment (taux de couverture des besoins). Les paragraphes qui suivent détaillent cette analyse, dans un premier temps pour le bâtiment tout entier, puis à l'échelle des parois.

4.2.2.1 Performance du bâtiment tout entier

La figure 4.9 présente le taux de couverture des besoins de la maison INCAS dans toutes les configurations (à gauche), ainsi que le taux d'exploitation des trois ressources (soleil, ciel et air) par la maison (à droite).

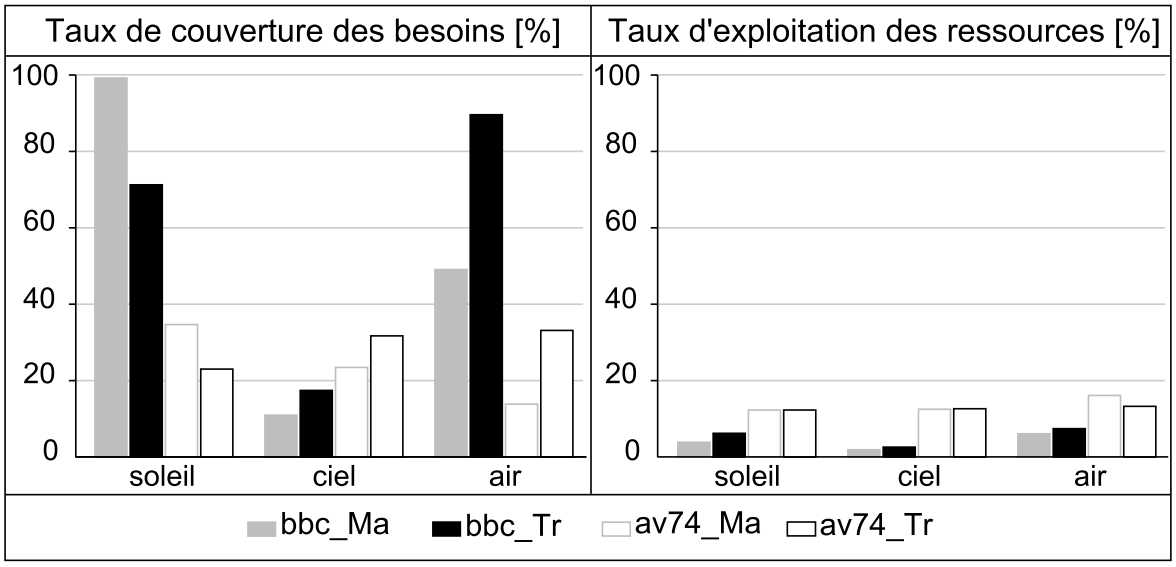

FIGURE 4.9 – Taux de couverture des besoins et taux d'exploitation des ressources dans les différentes configurations

4.2.2.1.1 Commentaires sur le taux de couverture des besoins

Le taux de couverture des besoins par les différentes ressources est très variable selon la configuration. Il est intéressant de constater que pour les deux sources radiatives que sont le ciel et le soleil, l'influence du niveau d'isolation et du climat s'inverse. Le niveau d'isolation et la douceur du climat

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

tendent à augmenter le taux de couverture du besoin de chauffage par le soleil et à diminuer le taux de couverture du besoin de rafraîchissement par le ciel, même si ce dernier est beaucoup plus faible que le premier. On constate que les taux de couverture les plus importants (>50%) sont atteints par le soleil et l'air dans les configurations de maison BBC, avec une valeur notable de près de 100% pour le taux de couverture du besoin de chauffage par le soleil de la maison BBC à Marseille.

4.2.2.1.2 Commentaires sur le taux d'exploitation des ressources

La lecture du graphique en taux d'exploitation montre une situation beaucoup plus homogène. Tels qu'ils sont construits, les bâtiments semblent buter sur une limite commune du taux d'exploitation des différentes ressources autour de 15%. Pour toutes les ressources, le comportement est le même : les bâtiments d'avant 1974 exploitent mieux les ressources que les bâtiments BBC et le climat ne semble pas jouer un rôle très important dans l'exploitation de ces ressources.

Ce constat est encourageant : même si elles sont très peu exploitées, les ressources étudiées permettent de couvrir selon les cas une grande partie des besoins. Pour toutes les ressources, il y a donc une importante marge en exploitation qui permettrait d'améliorer encore la performance des bâtiments.

4.2.2.2 Détail à l'échelle des parois

On peut également effectuer cette analyse à l'échelle des parois en examinant le taux d'exploitation des ressources radiatives (soleil et ciel) par les différents types de parois (murs et fenêtres), et par les différentes orientations.

4.2.2.2.1 Taux d'exploitation du soleil et du ciel par les murs et les fenêtres

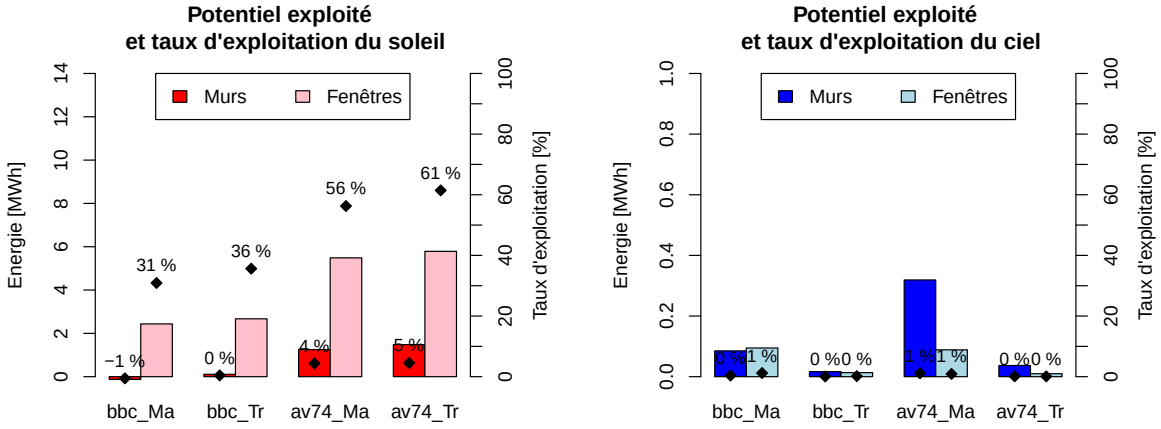

FIGURE 4.10 – Potentiel exploité annuel du soleil et du ciel et taux d'exploitation par les murs et les fenêtres dans les différentes configurations de la maison INCAS

La figure 4.10 présente le potentiel exploité des murs et des fenêtres de la maison INCAS dans ses différentes configurations, ainsi que la valeur du taux d'exploitation de la ressource dans chacun des cas. Les résultats pour le soleil sont présentés à gauche et ceux pour le ciel à droite. On voit sur cette figure que, dans tous les cas, les fenêtres exploitent beaucoup mieux le potentiel solaire que les murs. En version

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

BBC, le taux d'exploitation du soleil par les murs prend même des valeurs nulles voire négatives. En effet, lorsque le rayonnement solaire est exploité par les fenêtres il peut créer une surchauffe à l'intérieur du bâtiment et donc une déperdition de chaleur par les murs. Le flux énergétique perdu par la zone d'air vers les murs peut alors être supérieur dans la simulation avec soleil que dans la simulation sans soleil : le potentiel exploité du soleil par les murs est donc négatif. Sur cette figure on constate que les fenêtres de la maison d'avant 1974 exploitent beaucoup mieux le potentiel solaire que celles de la maison BBC, notamment grâce à un taux de transmission du rayonnement solaire plus élevé.

À l'inverse, pour le ciel on ne voit pas vraiment de différence entre l'exploitation par les murs et par les fenêtres : dans tous les cas, le taux d'exploitation du ciel par les parois est très faible, voire quasiment nul.

4.2.2.2.2 Taux d'exploitation du soleil en fonction de l'orientation

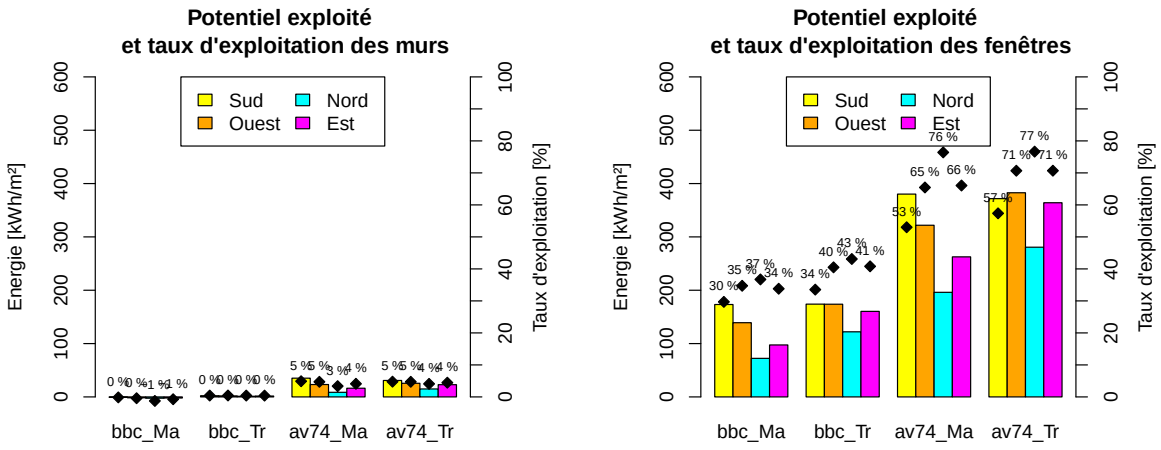

FIGURE 4.11 – Potentiel exploité annuel du soleil et du ciel et taux d'exploitation en fonction de l'orientation des parois de la maison INCAS

La figure 4.11 présente le potentiel exploité surfacique (rapporté à la surface de chaque paroi) ainsi que le taux d'exploitation du soleil par les murs (à gauche) et les fenêtres (à droite) en fonction des différentes orientations. On constate que l'orientation n'a pas beaucoup d'influence sur le potentiel exploité des murs qui reste assez faible. En conséquence, le taux d'exploitation du soleil par les murs n'est pas vraiment influencé par l'orientation et conserve une valeur nulle voire négative en BBC, et inférieure à 5% en version d'avant 1974.

Au contraire, le potentiel exploité surfacique des fenêtres est très dépendant de l'orientation : l'ordre est sensiblement le même que pour le potentiel concomitant (dans l'ordre décroissant : sud, ouest, est et nord), même si à Trappes le potentiel solaire exploité par les fenêtres est aussi important (voire plus en version d'avant 1974) à l'ouest qu'au sud. Cependant le taux d'exploitation du soleil par les fenêtres décroît lorsque le potentiel concomitant augmente. Ainsi les fenêtres orientées au nord sont celles qui exploitent le mieux le potentiel solaire, avec des taux d'exploitation proches de 80% dans les bâtiments d'avant 1974. On constate que les écarts entre l'exploitation par les différentes orientations sont beaucoup plus prononcés en version d'avant 1974 (où ils sont supérieurs à 20%) qu'en version BBC (où ils sont inférieurs à 10%).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.2.3 Effets indésirables des différentes ressources

Les ressources ont également des effets indésirables sur le bâtiment puisqu'elles génèrent aussi des besoins. Pour quantifier ces effets et comparer plusieurs configurations de bâtiment, on peut utiliser le taux de génération des besoins qui indique la part des besoins générée par une ressource. Pour visualiser l'impact global d'une ressource sur un bâtiment, on peut également calculer la différence entre le potentiel de la ressource exploité par le bâtiment (impact positif) et les besoins du bâtiment générés par la ressource (impact négatif). Cette différence nous permet alors de comparer plusieurs configurations. La figure 4.12 présente ces deux indicateurs : taux de génération des besoins par les ressources (à gauche) et impact global des ressources sur le bâtiment (à droite).

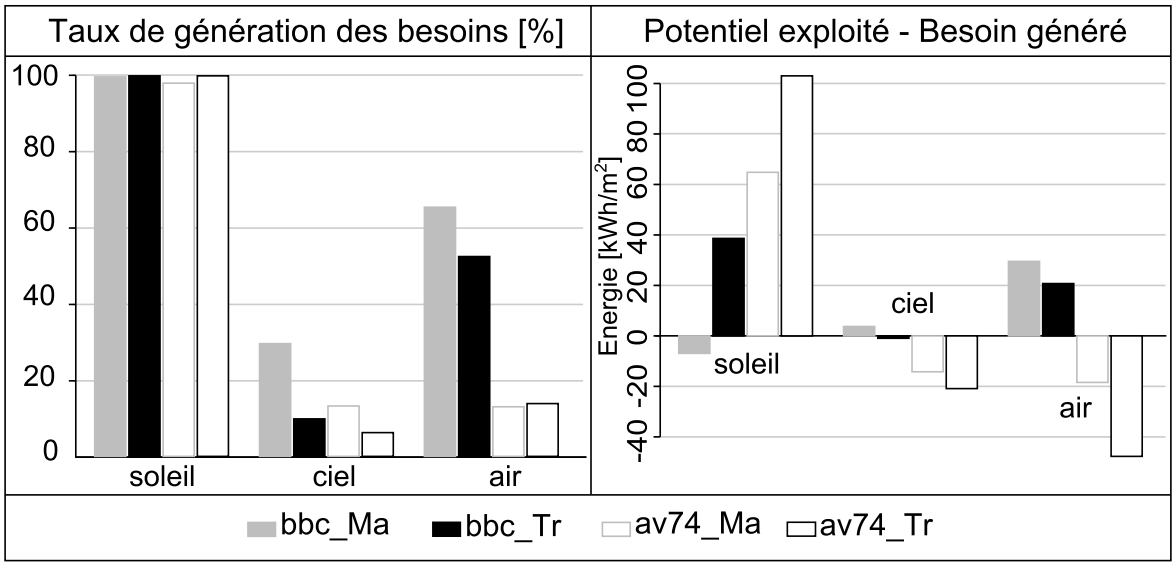

FIGURE 4.12 – Effets indésirables des ressources sur les bâtiments exprimés sous forme de taux de génération (à gauche) et sous forme d'impact global (à droite)

4.2.3.1 Taux de génération des besoins non désirés

Le taux de génération des besoins permet de connaître la part des besoins de rafraîchissement due au soleil, ainsi que la part des besoins de chauffage due au ciel ou à l'air.

On constate sans ambiguïté que l'intégralité des besoins de rafraîchissement est due au rayonnement solaire quelle que soit la configuration. C'est un résultat qui n'est pas nécessairement surprenant mais qui n'avait jamais été exprimé si clairement jusqu'alors. Le tableau 4.7 permet également de constater que la quantité de besoin généré ne semble pas dépendre du niveau d'isolation du bâtiment mais simplement du climat. Pour le ciel et l'air les résultats sont beaucoup plus nuancés.

Dans le cas de la maison BBC, le renouvellement d'air est responsable, à Marseille comme à Trappes, de plus de 50% des besoins de chauffage, et ceci malgré la récupération de chaleur de la ventilation double-flux. Cette valeur vient confirmer ce que l'on savait déjà, à savoir que la ventilation est le principal poste de déperdition dans un bâtiment isolé. Dans le cas des bâtiments d'avant 1974, même si le besoin de chauffage généré par l'air est en valeur absolue plus important que dans les bâtiments BBC (voir tableau 4.9), la contribution de l'air à la génération du besoin de chauffage total est plus faible, de l'ordre de 10 à 15%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Pour le ciel, on constate également que si le besoin de chauffage généré est, en valeur absolue, beaucoup plus élevé pour la maison d'avant 1974 que pour la maison BBC, le taux de génération du besoin de chauffage total par le ciel est plus faible dans la version non isolée. Dans tous les cas, ce taux est assez faible (moins de 30%). On remarque que le climat semble avoir un impact sur le taux de génération du besoin de chauffage par le ciel, qui est plus élevé à Marseille qu'à Trappes, et ce quelle que soit la version de bâtiment (BBC et avant 1974).

Il est également intéressant de noter que l'influence cumulée du ciel et de l'air de ventilation sur les besoins de chauffage de la maison non isolée ne dépasse guère 20 à 30%, ce qui signifie que d'autres sources de rafraîchissement, qui induisent donc des besoins de chauffage, pourraient être considérées (notamment le vent avec la convection sur les parois extérieures).

4.2.3.2 Impact global des ressources sur le bâtiment

Une autre manière de prendre en compte les effets non désirés d'une ressource de l'environnement sur un bâtiment est de considérer l'impact global de cette ressource sur le bâtiment, c'est-à-dire la différence entre le potentiel exploité (effet bénéfique) et les besoins générés (effet négatif) par cette ressource. La partie droite de la figure 4.12 présente ces résultats. On peut voir que le soleil a un impact globalement positif pour tous les bâtiments, surtout avant 1974, mis à part le bâtiment BBC à Marseille où l'impact du soleil est négatif. On constate également que l'impact de l'air est négatif pour les bâtiments avant 1974 et positif pour les bâtiments BBC. Cela s'explique par la prise en compte de la récupération de chaleur sur air extrait mise en place sur le système de ventilation du bâtiment BBC qui permet de diminuer les besoins générés par le renouvellement d'air et augmenter ainsi le bilan.

4.2.4 Conclusions sur l'analyse globale des résultats

Pour tous les bâtiments, y compris les bâtiments non isolés, et dans tous les climats étudiés, y compris les moins favorables, les ressources utiles et disponibles sont toujours supérieures aux besoins correspondants. La volonté de couvrir les besoins par les ressources de l'environnement n'est donc pas une question de ressources, mais une question de moyens.

L'analyse globale a également montré que cet excédent de ressources, ce qu'on a appelé la marge bioclimatique des ressources, était favorisé par l'isolation, et ce dans tous les cas de figures. Il apparaît ainsi de façon claire que la réserve de ressources utiles à tous les besoins est bien plus importante pour les bâtiments BBC que pour les bâtiments non isolés. Pour le chauffage cela est principalement dû à la baisse du besoin ; pour le rafraîchissement, cela est principalement dû à l'augmentation du potentiel de l'air. Ce constat peut sembler logique et évident pour la ressource solaire et le besoin de chauffage. Il est beaucoup moins intuitif pour les ressources combinées du ciel et de l'air extérieur au regard des besoins de rafraîchissement.

Pour les bâtiments non isolés ces résultats laissent penser que la seule exploitation des ressources pourrait être une solution trop extrême pour couvrir efficacement les besoins. Mais il semble également qu'il est tout aussi extrême de ne compter que sur l'isolation. La voie la plus raisonnable est très probablement de combiner isolation et exploitation des ressources pour y parvenir. Il ne s'agit plus seulement de viser une performance finale, une consommation énergétique pour des usages donnés, mais bien aussi d'exploiter le mieux possible les ressources utiles de l'environnement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Quelques résultats à l'échelle des parois ont été présentés dans cette partie. Ils montrent notamment l'influence de l'orientation des parois sur leur potentiel solaire concomitant. Ainsi, l'orientation sud est celle qui présente le plus grand potentiel, suivie de l'ouest, de l'est, et du nord. Cet ordre est assez classique dans l'expression du potentiel solaire total mais il n'était pas acquis pour la partie utile de ce potentiel, présente en hiver lorsque le rayonnement diffus isotrope est majoritaire. Les résultats ont également montré que la ressource solaire est globalement beaucoup mieux exploitée par les fenêtres que par les murs qui peuvent même présenter un bilan négatif de cette exploitation. En effet, pendant les journées d'hiver, le rayonnement solaire, qui est bien exploité par les fenêtres par transmission directe, tend à réchauffer l'air intérieur et à augmenter les pertes thermiques par toutes les parois, mais les parois opaques qui ne transmettent pas le flux solaire présentent alors un bilan déficitaire.

L'analyse globale a également permis de constater que le potentiel de rafraichissement du ciel, qui n'est pas négligeable, n'est pas du tout exploité, ni par les parois opaques, ni par les parois vitrées. Il s'agit pourtant là d'une piste d'amélioration du comportement énergétique estival des bâtiments car le ciel est une ressource permanente qui pourrait permettre de couvrir la totalité des besoins de rafraîchissement à chaque instant dans la plupart des configurations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.3 Analyse du comportement des parois par rapport au soleil

L'analyse globale des indicateurs au niveau du bâtiment nous a permis de dégager quelques tendances sur l'utilisation du potentiel de l'environnement dans différentes configurations. En général, le potentiel est supérieur aux besoins du bâtiment mais il est assez mal exploité dans tous les cas. Une analyse plus précise au niveau des parois permettrait d'expliquer ces tendances. Cette analyse est possible pour le soleil et le ciel qui sont deux ressources radiatives mais elle n'a pas de sens pour l'air. La faible exploitation du ciel par le bâtiment s'explique par le fait que cette ressource est très méconnue est qu'aucun dispositif d'enveloppe n'est réellement mis en place pour l'utiliser. Ainsi, les valeurs des indicateurs sont très faibles et les écarts qui existent entre les différentes situations ne sont pas assez significatifs pour être analysés de manière détaillée. L'analyse au niveau des parois va donc se concentrer sur le comportement de ces parois vis-à-vis de la ressource solaire exclusivement.

4.3.1 L'analyse en composantes principales (ACP)

4.3.1.1 Les indicateurs à l'échelle des parois : un jeu de données multidimensionnel

Les résultats des simulations ont été analysés de façon globale dans la section précédente, notamment au niveau des parois. Cette première analyse a permis de repérer des tendances globales : la ressource solaire est globalement peu exploitée et elle génère la totalité des besoins de rafraîchissement dans toutes les configurations, mais elle a un impact globalement positif sur les besoins des bâtiments. Mais cette approche seule ne permet pas une vision détaillée des interactions entre les différentes parois et les apports solaires. Il faut pour cela étudier l'influence des nombreux paramètres sur ces critères afin d'orienter des pistes de réflexion menant à une meilleure exploitation.

Cependant, le nombre de données à analyser est assez élevé, même en les intégrant toutes sur une année complète puisqu'on a, au niveau de chaque paroi, 3 indicateurs absolus (potentiel concomitant, potentiel exploité et besoins générés) et 3 indicateurs relatifs (taux de couverture, taux d'exploitation et taux de génération des besoins). On peut également vouloir expliquer le comportement des parois en fonction de leur surface. Au niveau des parois on distingue les parois vitrées des parois opaques, les parois BBC des parois avant 1974, les parois dans le climat de Marseille et de Trappes, et ceci pour les deux zones du modèle de maison INCAS utilisé ainsi que pour chaque orientation. On obtient donc un jeu de 448 données. Il est donc particulièrement difficile d'appréhender et d'analyser ce jeu de données de façon objective et non orientée sans méthode adaptée. Pour cette raison, nous avons choisi la méthode d'analyse en composantes principales (ACP) que nous présentons dans les paragraphes suivants.

4.3.1.2 Avantages de l'ACP

En analyse de données, les tableaux sont traditionnellement représentés par le croisement d'individus (en lignes) et de variables quantitatives ou qualitatives (en colonnes) (figure 4.13). Parmi les méthodes permettant d'analyser de tels jeux de données multidimensionnels, les méthodes factorielles occupent une place de choix en raison de la représentation graphique plane qu'elles permettent, et donc de l'aisance de l'interprétation qui peut en être faite. Le but de ce type de méthodes est de réduire le nombre de variables utiles d'un jeu de données et d'assurer une réelle objectivité dans l'analyse ([Escofier et Pagès, 2008]). Ces méthodes peuvent être couplées à des méthodes de classification dont le but est cette fois de réduire

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

le nombre d'individus en formant des groupes homogènes. Dans notre cas, les individus représentent les configurations de parois et sont donc déjà classés selon des groupes prédéfinis (opaque ou vitrée, orientation, météo, version de bâtiment). On ne cherchera donc pas à former de nouveaux groupes d'individus et on n'utilisera pas de méthode de classification.

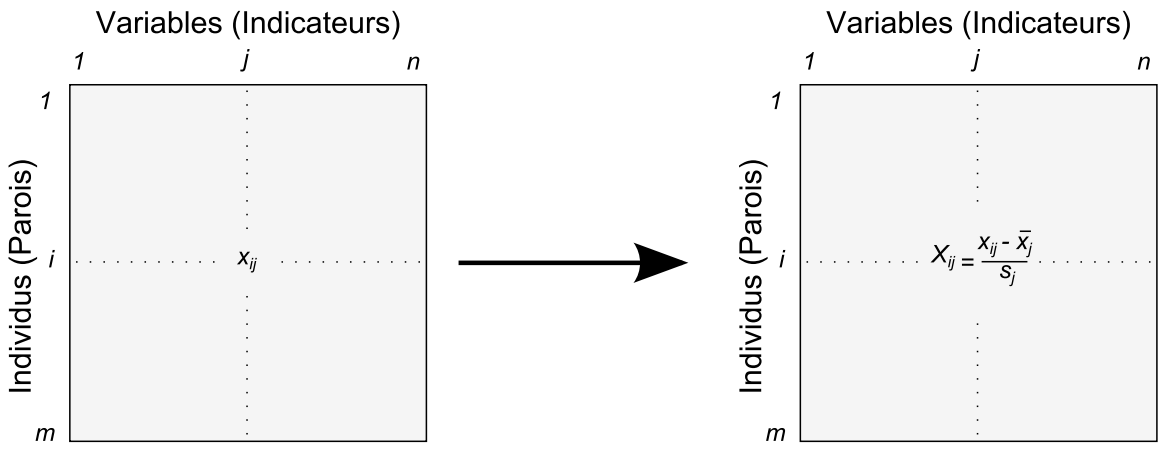

FIGURE 4.13 – Exemple de jeu de données multidimensionnel (m individus $*$ n variables) où x_{ij} est la valeur prise par la variable j pour l'individu i et tableau de données centrées-réduites (à droite) avec $\bar{x_j}$ et s_j moyenne et écart-type de la variable j

La méthode factorielle la plus utilisée pour analyser des données quantitatives, ce qui est le cas ici, est la méthode d'analyse en composantes principales qui sera décrite dans les paragraphes suivants avant d'être appliquée aux indicateurs. En pratique, le jeu de données utilisé pour l'analyse est préalablement centré et réduit (figure 4.13), afin d'obtenir une meilleure représentation graphique d'une part et d'assurer une bonne homogénéité des données d'autre part (à cause des différentes unités).

4.3.1.3 Principe de l'ACP

L'ACP permet d'aborder les relations entre individus et entre variables de deux manières différentes. En effet les problématiques ne sont pas les mêmes selon que l'on s'intéresse au comportement des différentes parois (nos individus) ou aux différents indicateurs (nos variables).

Pour les individus, on va rechercher les ressemblances : deux individus se ressemblent s'ils prennent des valeurs proches pour l'ensemble des variables. Cette notion de proximité entre deux individus i_1 et i_2 est évaluée à l'aide de la distance euclidienne :

$$d^2(i_1, i_2) = \sum_{j=1}^{n} (X_{i_1 j} - X_{i_2 j})^2 \tag{4.1}$$

Pour les variables on va rechercher les corrélations, c'est-à-dire les relations linéaires qui existent entre elles. Cette corrélation entre deux variables j_1 et j_2 est évaluée par le coefficient de relation linéaire :

$$r(j_1, j_2) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} X_{ij_1} X_{ij_2} \tag{4.2}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Le but de l'analyse est de pouvoir représenter ces ressemblances entre individus et ces corrélations entre variables dans un plan afin d'aider à leur interprétation. Pour cela il est nécessaire de comprendre comment s'agence la représentation du nuage des individus et des variables, et comment s'opère le choix des plans.

4.3.1.3.1 Nuage des variables et des individus

Chaque individu (ligne du tableau) peut être représenté dans l'espace à n dimensions des variables par un point ayant pour coordonnées les n valeurs des variables pour cet individu. On peut ainsi représenter l'ensemble des individus dans l'espace des variables comme un nuage de points dont le centre de gravité est confondu avec l'origine des axes puisque les variables sont centrées. La proximité des individus est illustrée par la distance euclidienne entre les points les représentant (figure 4.14 à gauche).

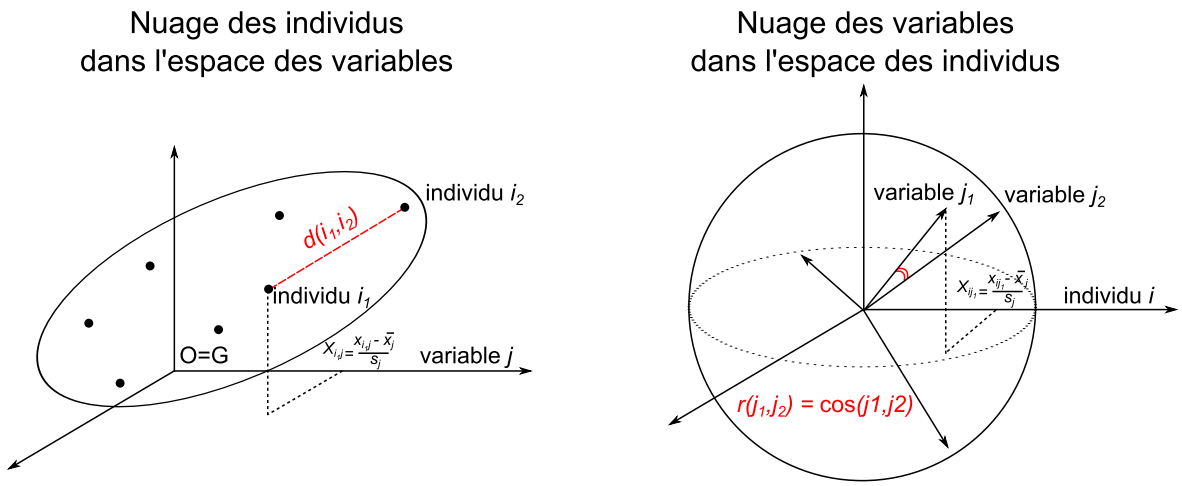

FIGURE 4.14 – Représentation du nuages des individus dans l'espace des variables (à gauche) et représentation du nuage des variables dans l'espace des individus (à droite)

De même chaque variable (colonne du tableau) peut-être représentée dans l'espace à m dimensions des individus par un vecteur dont les coordonnées sont les valeurs prises par cette variable pour tous les individus. Comme les variables sont centrées-réduites, la norme de chaque vecteur est égale à 1 et l'ensemble des variables peut ainsi être représenté sur une hypersphère de rayon unitaire (figure 4.14 à droite). La corrélation entre deux variables est égale au produit scalaire de leur représentation vectorielle, et donc au cosinus de l'angle entre les deux vecteurs puisqu'ils sont normés.

Pour établir les corrélations éventuelles entre les variables, on doit donc calculer les angles entre tous les vecteurs, ce qui est malaisé compte-tenu de la dimension de l'espace des individus (hyperespace). Pour contourner cette difficulté, l'ACP va permettre d'obtenir des variables synthétiques qui permettent à leur tour de définir des plans contenant un maximum d'informations et sur lesquels les variables initiales sont projetées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.3.1.3.2 Représentation factorielle

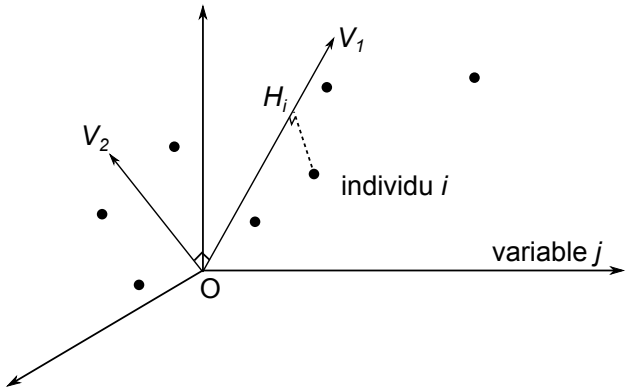

FIGURE 4.15 – Construction de la base $\{V\}$ des composantes principales

Pour chercher à expliquer la dispersion du nuage des individus par des variables synthétiques, on procède à un changement de base : on va alors chercher une base orthogonale $\{V\}$ telle que la projection du nuage des points sur chacun des vecteurs de la base conserve le plus possible l'inertie du nuage. À ce stade on peut introduire le concept de « variable illustrative » : on peut vouloir exclure du changement de base des variables qu'on ne veut pas utiliser dans la détermination des directions d'allongement du nuage. Dans notre exemple, la surface des parois est une variable qu'on veut simplement pouvoir comparer aux indicateurs mais qui ne doit pas expliquer l'allure du nuage.

Une fois les variables illustratives exclues de la base de départ, on cherche la base $\{V\}$ d'arrivée. En pratique on cherche d'abord le premier vecteur de la base V_1 tel que $\sum_i OH_i^2$ soit maximum, H_i étant le projeté orthogonal du point i sur le vecteur V_1 (figure 4.15). Puis on cherche le vecteur V_2 orthogonal à V_1 et satisfaisant le même critère, et ainsi de suite.

De la même manière on cherche la base orthogonale $\{I\}$ conservant le plus possible l'inertie du nuage des variables dans l'espace des individus. On peut également vouloir exclure des individus du changement de base : ces individus sont alors appelés « individus illustratifs ». Dans notre cas, tous les individus sont pris en compte pour déterminer la nouvelle base du nuage des variables.

On peut montrer que les vecteurs de même rang des deux bases $\{V\}$ et $\{I\}$ sont colinéaires, ce qui permet d'analyser la projection des variables et la projection des individus de manière conjointe. Les vecteurs de la nouvelle base représentent en fait les directions d'allongement maximal à la fois du nuage des variables et de celui des individus et peuvent être interprétés comme de nouvelles variables synthétiques : ce sont les composantes principales du nuage de points. Chacune d'entre elles est caractérisée par la partie de l'inertie du nuage qu'elle conserve et la construction de la base implique que la conservation de l'inertie décroisse avec le rang du vecteur dans la base. Ainsi, l'inertie est maximale dans le plan formé par les deux premières composantes, appelé aussi premier plan factoriel. La plupart du temps, l'interprétation de la position des variables et des individus dans ce plan est suffisante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.3.1.3.3 Interprétation graphique

Suite à la construction de la base des composantes principales et à la projection, d'une part du nuage des variables, et d'autre part du nuage des individus, sur le premier plan factoriel de cette base, on dispose désormais de deux représentations graphiques planes qui peuvent être examinées conjointement.

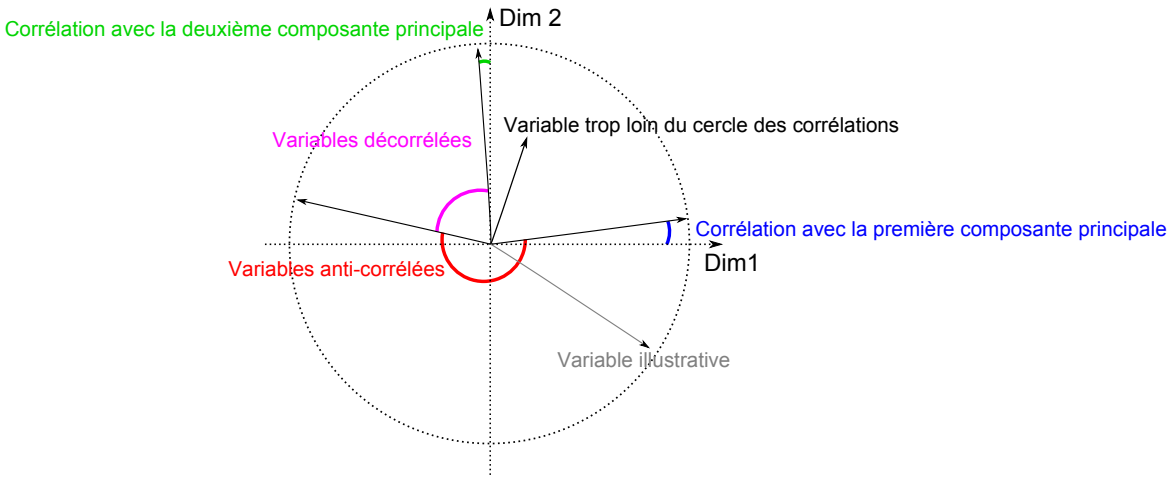

FIGURE 4.16 – Cercle des corrélations entre les variables

Cercle des corrélations entre les variables Tout d'abord, étant donné que les deux premières dimensions représentent de nouvelles variables synthétiques il est intéressant de les comparer aux variables initiales. Pour cela on considère le graphique de projection des variables : il s'agit d'un cercle de rayon unitaire puisque les variables étaient représentées sur une sphère de même rayon. Comme on recherche d'une part les corrélations entre les variables de départ et les dimensions principales, et d'autre part les corrélations entre les variables, le cercle est appelé « cercle des corrélations ».

Pour interpréter correctement ce graphique il faut avoir à l'esprit que la projection sur le premier plan factoriel maximise les distances et les angles. Ainsi les variables les plus proches du cercle des corrélations sont celles qui sont le mieux représentées dans le plan et on n'interprète pas celles qui sont trop loin de ce cercle. De plus, l'angle entre deux variables nous renseigne sur la corrélation qui existe entre elles car le coefficient de corrélation est égal au cosinus de cet angle. Ainsi, trois cas sont identifiables :

- L'angle entre deux variables est très faible, son cosinus est donc proche de 1 et les variables sont bien corrélées.
- L'angle entre deux variables est proche de π, son cosinus est proche de -1 et les variables sont anti-corrélées.
- L'angle entre deux variables est proche de $\frac{\pi}{2}$, son cosinus est proche de 0 et les variables sont décorrélées.

Dans les autres cas on ne peut rien dire de la corrélation entre deux variables.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Ellipses de confiance autour des individus Les individus peuvent également être représentés dans le premier plan factoriel et on repère leur position par rapport aux principales dimensions. Dans notre cas les individus sont des parois qui sont caractérisées par leur appartenance à plusieurs catégories, chaque catégorie s'exprimant sous la forme de modalités. Dans l'analyse, on va représenter les différentes catégories par des variables qualitatives qui ne seront prises en compte que de manière illustrative, c'est-à-dire sans perturber la définition des composantes principales. Dans notre cas, on a donc quatre variables illustratives qui sont listées avec toutes leurs modalités dans le tableau 4.3.1.3.3.

Variable illustrative	Modalités
Orientation de la paroi	Sud (S), Ouest (O), Nord (N) ou Est (E)
Type de paroi	Mur (M) ou fenêtre (F)
Version de bâtiment	BBC (bbc) ou avant 1974 (av74)
Météo	Marseille (Ma) ou Trappes (Tr)

TABLE 4.10 – Liste des variables qualitatives illustratives utilisées dans l'ACP et de leur modalités

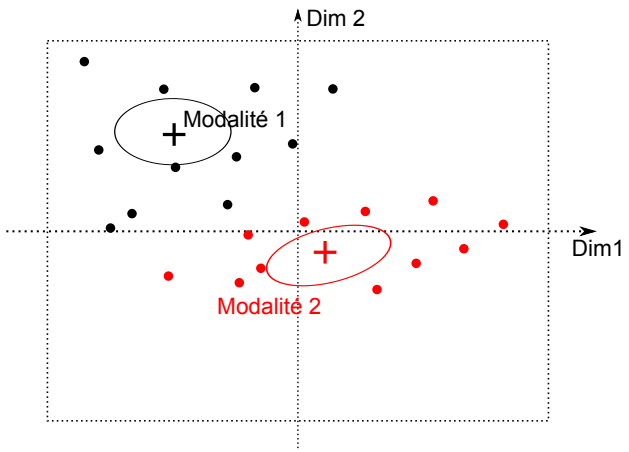

FIGURE 4.17 – Ellipses de confiance autour des individus pour les deux modalités d'une variable

Une fois les individus projetés dans le premier plan factoriel, on peut représenter, pour chaque variable illustrative, ses différentes modalités par un code couleur (figure 4.17). On peut aussi représenter sur le graphique le centre de gravité de chaque modalité et tracer, autour de ce point, une ellipse de confiance illustrant la dispersion de cette modalité. Si les ellipses de confiance des modalités d'une variable ne se recoupent pas c'est que ces modalités ont des comportements bien distincts.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.3.2 L'ACP appliquée aux indicateurs de potentiel et de performance des parois

L'ACP va être utilisée ici pour mieux comprendre le comportement des parois, c'est-à-dire la manière dont varient les indicateurs de potentiel et de performance en fonction des différentes configurations. Le tableau complet utilisé pour l'analyse en composantes principales est donné en annexe A, et sa structure est présentée sur la figure 4.18 qui récapitule les différentes variables et les codes utilisés. On rappelle que seuls les indicateurs de potentiel et de performance solaires sont analysés. Les variables qualitatives illustratives que sont l'orientation de la paroi, le type de paroi, la version de bâtiment et la météo seront représentées sur le graphique des individus par des couleurs différentes et des ellipses de confiance. La variable quantitative illustrative qu'est la surface de la paroi sera représentée sur le cercle des corrélations comme les autres variables.

	Variables qualitatives illustratives				Variable quantitative illustrative	Variables quantitatives = Indicateurs			
Individus	Version de bâtiment (**version**)	Météo (**meteo**)	Orientation (**orient**)	Type de paroi (**type**)	Surface de la paroi [m²]	Potentiel concomitant [kWh/m²]	Taux d'exploitation [%]	Taux de couverture [%]	Taux de génération [%]
1	BBC (**bbc**)	Marseille (**Ma**)	Sud (**S**)	Mur (**M**)					
2	Avant 1974	Trappes (**Tr**)	Ouest (**O**)	Fenêtre (**F**)					
3	(**av74**)	⋮	Nord (**N**)	⋮					
4	⋮	⋮	Est (**E**)	⋮					
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮					

FIGURE 4.18 – Structure du tableau de données utilisé dans l'ACP

4.3.2.1 ACP sur toutes les parois

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet une analyse objective et sans a priori des données. Pour cette raison, on réalise une première ACP de l'ensemble du jeu de données. Le but de cette première étape est de repérer des comportements particuliers pour pouvoir les analyser par la suite en sélectionnant des sous-ensembles. Le résultat de cette première analyse sur toutes les parois est représenté sur la figure 4.19.

La projection dans le premier plan factoriel des variables et des individus conserve près de 80% de l'inertie du nuage initial, ce qui va nous permettre d'interpréter les résultats en termes de corrélation entre les variables et de proximité entre les individus. L'étude du cercle des corrélations (figure 4.19 à gauche) montre que les indicateurs sont peu corrélés entre eux mis à part peut-être le taux de génération qui est relativement bien corrélé au taux de couverture. Ainsi, les parois qui permettent de bien couvrir les besoins de chauffage sont également celles qui génèrent le plus de besoin de rafraîchissement. On pense immédiatement aux fenêtres. Le taux d'exploitation du soleil par les parois ne semble pas lié aux autres indicateurs, notamment au potentiel concomitant : cela signifie que la valeur du potentiel solaire d'une paroi ne donne pas d'indication sur la manière dont celle-ci l'exploite. En revanche, on voit que le taux d'exploitation est complètement anti-corrélé à la surface : dans la configuration de la maison INCAS, les grandes parois sont celles qui exploitent le moins bien le potentiel solaire.

Pour interpréter les résultats concernant les individus, il est nécessaire de repérer les corrélations

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

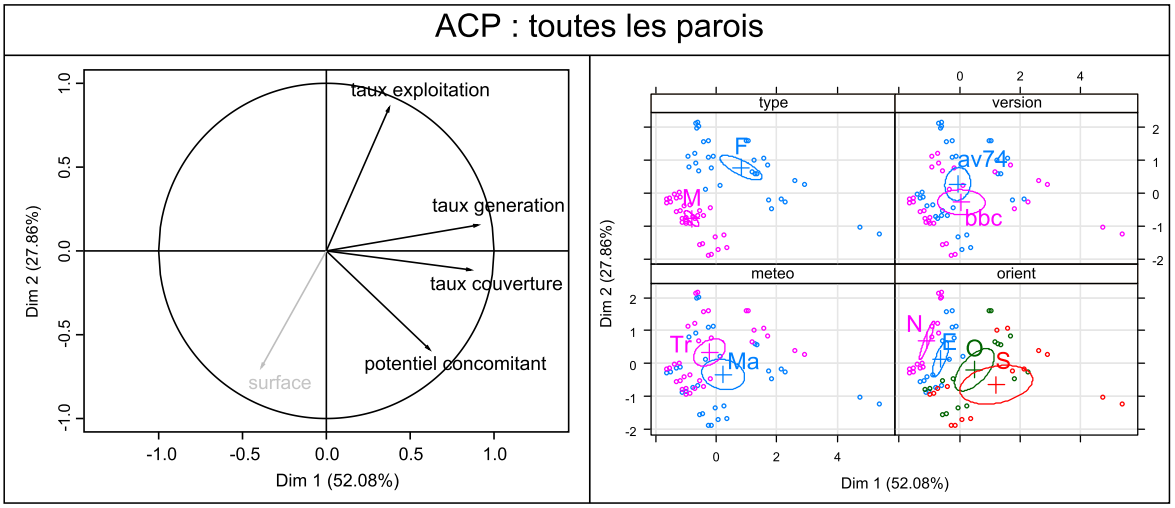

FIGURE 4.19 – ACP sur les toutes les parois

entre les deux dimensions principales et les indicateurs. On remarque ainsi que la première dimension (horizontale) est clairement corrélée au couple d'indicateurs (taux de couverture, taux de génération) tandis que la deuxième dimension est corrélée positivement au taux d'exploitation et négativement à la surface. Lorsqu'on projette le nuage des individus dans ce repère (figure 4.19 à droite) en représentant les variables illustratives et leur modalités, on peut tirer plusieurs enseignements.

On constate tout d'abord que le type de paroi (mur ou fenêtre) est très discriminant dans la distribution des individus qui sont clairement séparés en deux groupes selon l'axe vertical (taux d'exploitation) : les fenêtres exploitent donc beaucoup mieux le potentiel solaire que les murs. On retrouve les conclusions de l'analyse globale réalisée dans la partie précédente. On voit également que le nuage des fenêtres (en bleu) et celui des murs (en rose) n'a pas la même allure. Cela signifie que ces deux types de parois semblent avoir un comportement distinct et on analysera séparément chacun de ces sous-ensembles dans la suite.

On peut également remarquer sur cette figure que la version de bâtiment ou la météo ne semblent pas vraiment influencer la répartition des modalités. Globalement, on peut tout de même dire que les parois de la maison d'avant 1974 exploitent mieux le potentiel solaire que les parois de la maison BBC, et que la plupart des parois ont un potentiel concomitant plus élevé à Marseille qu'à Trappes. Enfin, l'orientation semble avoir une influence sur le comportement des parois puisque les modalités (sud, ouest, nord, et est) sont distribuées selon la direction du potentiel concomitant. On retrouve bien l'ordre obtenu à partir de l'analyse globale des résultats.

4.3.2.2 ACP sur les fenêtres

Le jeu de données est donc restreint aux fenêtres et une nouvelle ACP est réalisée (figure 4.20). La conservation de l'inertie dans le premier plan factoriel est cette fois de l'ordre de 83% et on retrouve quelques similarités avec les résultats obtenus à partir de toutes les parois. En effet, le comportement du bâtiment par rapport au soleil s'explique principalement par celui de ses parois vitrées.

Le cercle des corrélations est tracé sur la figure 4.20 (à gauche). Son analyse montre quelques ressemblances avec l'analyse réalisée sur l'ensemble des parois. On observe par exemple que le taux de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

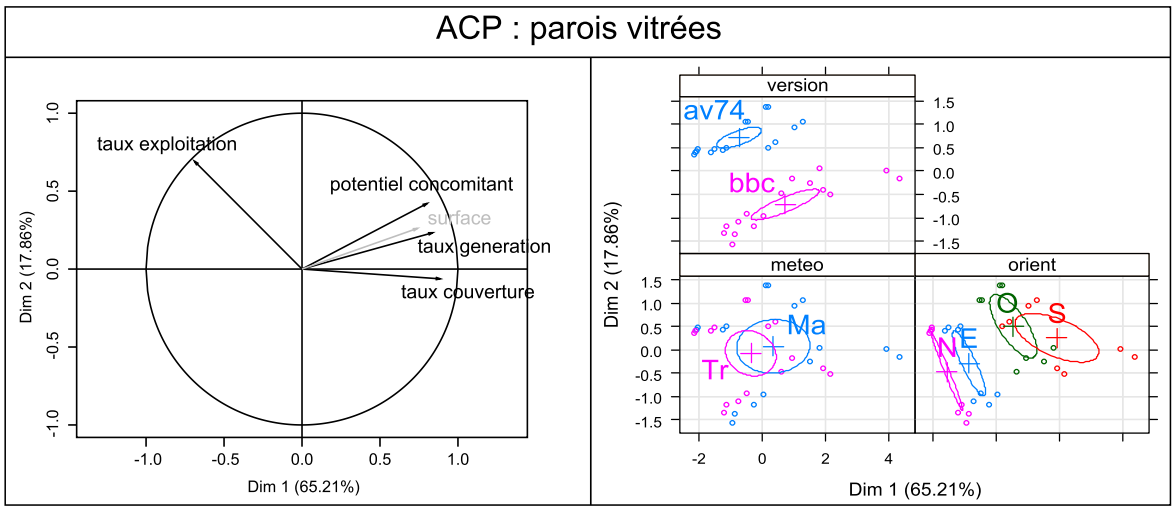

FIGURE 4.20 – ACP sur les fenêtres

couverture et le taux de génération sont à nouveau très corrélés. Cela montre qu'il est difficile de bien couvrir les besoins de chauffage du bâtiment avec les fenêtres sans générer des besoins de rafraîchissement en période estivale. En outre, comme pour l'ensemble des parois, on remarque que le potentiel concomitant et le taux d'exploitation sont décorrélés. On ne peut donc pas conclure sur la relation entre ces deux indicateurs, même si l'analyse globale nous a montré dans la partie précédente que le taux d'exploitation était en général anti-corrélé au potentiel concomitant des fenêtres.

On remarque cependant quelques différences entre l'analyse sur toutes les parois et l'analyse sur les fenêtres. Par exemple, le potentiel concomitant, qui ne semblait corrélé à aucun indicateur de performance dans l'analyse à l'échelle des parois, est bien corrélé aux taux de couverture et de génération des besoins dans l'analyse restreinte aux fenêtres. Ainsi, une fenêtre qui a un fort potentiel solaire concomitant a tendance à avoir un impact important sur les besoins de chauffage et de rafraîchissement de la zone. La seconde comparaison est liée à la surface. Dans l'analyse sur toutes les parois, on a vu que cette surface était clairement anti-corrélée au taux d'exploitation des parois. Pour les fenêtres, il semble plutôt que la surface soit corrélée au potentiel concomitant, ce qui montre que la taille des ouvertures vitrées est bien conçue dans cet exemple puisque les fenêtres les plus grandes sont celles qui ont le plus grand potentiel solaire surfacique.

On peut ensuite analyser le rôle des différentes catégories de fenêtres en détaillant la projection des individus à droite de la figure 4.20. Comme dans l'analyse pour toutes les parois, la météo ne semble pas jouer de rôle prépondérant sur les indicateurs de potentiel et de performance des fenêtres, même si globalement les fenêtres ont un potentiel concomitant plus élevé à Marseille qu'à Trappes. De même l'orientation des fenêtres est à nouveau distribuée selon l'axe du potentiel concomitant comme pour l'ensemble des parois. En revanche, la version de bâtiment, dont on ne percevait pas le rôle dans l'analyse sur toutes les parois, se révèle ici un élément déterminant dans la performance des fenêtres : les fenêtres de la maison en version d'avant 1974 exploitent beaucoup mieux le potentiel solaire que les fenêtres de la maison BBC. Cela rejoint les conclusions de l'analyse globale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.3.2.3 ACP sur les murs

Après avoir considéré seulement les fenêtres, on s'attache désormais au comportement des murs. L'analyse est toujours significative puisque le premier plan factoriel conserve près de 87% de l'inertie du nuage des individus « murs » et les résultats sont particulièrement intéressants (figure 4.21).

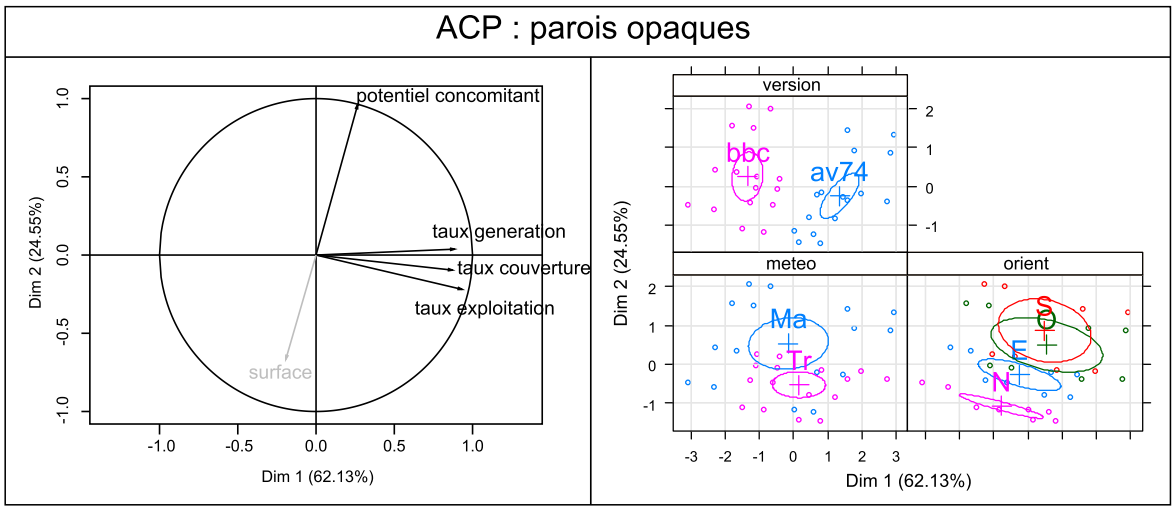

FIGURE 4.21 – ACP sur les murs

L'observation du cercle des corrélations (figure 4.21 à gauche) révèle des différences significatives avec l'analyse sur les fenêtres. On peut voir par exemple que les rôles du potentiel concomitant et du taux d'exploitation sont inversés : cette fois tous les indicateurs de performance (taux d'exploitation, taux de couverture et taux de génération) sont très bien corrélés entre eux et complètement décorrélés du potentiel concomitant. On ne peut donc pas conclure sur la relation entre ces deux groupes d'indicateurs, ce qui confirme les résultats de l'analyse globale qui montraient que le taux d'exploitation des murs était relativement faible et peu variable par rapport à la variation du potentiel concomitant dans les différentes configurations.

Une autre différence remarquable est la relation entre la surface d'un mur et son potentiel concomitant. Dans le cas des fenêtres, ces deux indicateurs étaient corrélés : les plus grandes fenêtres étaient celles qui avaient le potentiel solaire le plus important. Logiquement, c'est l'inverse pour les murs car les parois qui ont les plus grandes surfaces vitrées sont aussi celles qui ont les plus petites surfaces opaques.

L'axe horizontal du premier plan factoriel est donc très corrélé aux indicateurs de performance (et de contre-performance) tandis que l'axe vertical est très bien corrélé au potentiel concomitant (et donc anti-corrélé à la surface). On peut alors observer la répartition des différentes parois par rapport à ces deux axes (figure 4.21 à droite). Globalement on peut dégager les mêmes conclusions que pour les fenêtres, notamment l'importance de la version de bâtiment (et donc de l'isolation des murs) quant à leur taux de performance. Les murs de la maison d'avant 1974 sont plus performants que ceux de la maison BBC. Cette remarque est toutefois à nuancer compte-tenu des faibles valeurs d'exploitation observées dans la partie précédente.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.3.2.4 Conclusions sur les résultats de l'ACP

L'analyse en composantes principales nous a permis d'étudier les relations entre potentiel et performances de toutes les parois de façon méthodique et objective. En représentant les différentes parois, selon leur catégorie (type de paroi, météo, orientation et version de bâtiment), et dans un repère déterminé par les indicateurs les plus représentatifs de leur comportement, nous avons non seulement retrouvé les remarques générales établies dans la partie précédente, mais aussi mieux caractérisé le comportement de ces parois. On a ainsi pu constater que les parois vitrées et opaques se comportaient très différemment vis-à-vis de la ressource solaire. D'un côté, les parois opaques ont des taux de performance (très faibles) complètement indépendants de leur potentiel solaire. De l'autre côté, l'impact du soleil sur les besoins, à travers les fenêtres, est très lié au potentiel solaire de ces fenêtres. L'analyse globale avait également montré que les fenêtres qui avaient le plus grand potentiel étaient celles qui l'exploitaient le moins bien. Dans tous les cas, deux pistes semblent se dessiner pour l'amélioration des performances solaires de l'enveloppe :

- l'amélioration du taux d'exploitation du soleil par les parois opaques,
- la prise en compte d'un comportement saisonnier afin de décorréler le taux de couverture des besoins de chauffage et le taux de génération des besoins de rafraichissement par les parois.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4 Analyse dynamique des résultats

Dans un premier temps nous avons analysé les indicateurs de potentiel de manière globale, c'est-à-dire en valeurs intégrées sur l'année. Cette analyse nous a montré que pour toutes les ressources, et dans toutes les configurations, le potentiel des ressources utiles est supérieur aux besoins thermiques des bâtiments. Cependant, la comparaison entre le potentiel ajusté des deux ressources intermittentes que sont le soleil (présent seulement le jour) et l'air (utilisation par sur-ventilation nocturne estivale), et les besoins, montre un bilan déficitaire dans la plupart des cas. Autrement dit, globalement les ressources sont suffisantes pour couvrir les besoins mais cette affirmation n'est pas vérifiée à chaque instant dans le cas du soleil et de l'air.

L'analyse dynamique, menée dans cette partie, doit nous permettre de comprendre la distribution temporelle des besoins et des ressources afin de mieux appréhender les décalages entre les deux. Dans un premier temps, cette analyse prendra la forme d'un simple examen visuel des courbes représentant les indicateurs tout au long de l'année. Une analyse des corrélations entre les différentes courbes sera ensuite menée, permettant notamment de définir le temps de réponse effectif du bâtiment aux sollicitations des ressources. Enfin, à partir de ces observations, on proposera des pistes d'évaluation, en durée et en puissance, d'éventuels besoins de stockage des ressources.

4.4.1 Examen visuel de la représentation graphique des valeurs instantanées des indicateurs

La manière la plus simple et la plus intuitive pour comprendre l'évolution des indicateurs en valeur instantanée, tout au long de l'année, est l'examen de leur représentation graphique. Cela permet en effet de repérer la saisonnalité des phénomènes et la superposition ou le déphasage des courbes. Cette analyse sera menée tout d'abord sur les besoins réels et résiduels, puisqu'ils sont à la base du calcul des indicateurs, puis sur les indicateurs de potentiel, et enfin sur le potentiel exploité.

4.4.1.1 Besoins réels et résiduels pour chaque ressource

Les besoins représentent le comportement thermique du bâtiment. Pour cette raison, il semble important de commencer l'analyse dynamique par l'observation des courbes représentant l'évolution annuelle des besoins réels et résiduels pour chaque ressource. L'allure des courbes de besoin réel nous montre l'influence du climat sur le bâtiment alors que l'allure des courbes de besoin résiduel nous montre le comportement des bâtiments vis-à-vis de chaque ressource.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.1.1.1 Soleil

La figure 4.22 présente l'évolution sur une année des besoins de chauffage réels (sans soleil) et résiduels de la maison INCAS dans les différentes configurations. Ce mode de représentation nous permet de tirer plusieurs constats, notamment sur l'allure des courbes représentant les besoins réels pour un même climat. La comparaison des courbes du besoin réel des bâtiments BBC et d'avant 1974, d'une part pour le climat de Marseille, et d'autre part pour celui de Trappes, nous montre en effet que si l'amplitude est différente, l'allure est la même. Autrement dit, le passage d'un bâtiment non isolé à un bâtiment bien isolé ne permet vraiment de réduire les périodes de besoin de chauffage réel (sans soleil), et on voit par exemple qu'il subsiste des besoins en été dans tous les cas. Ce phénomène est beaucoup plus visible à Trappes où il reste également des besoins de chauffage résiduels en plein été.

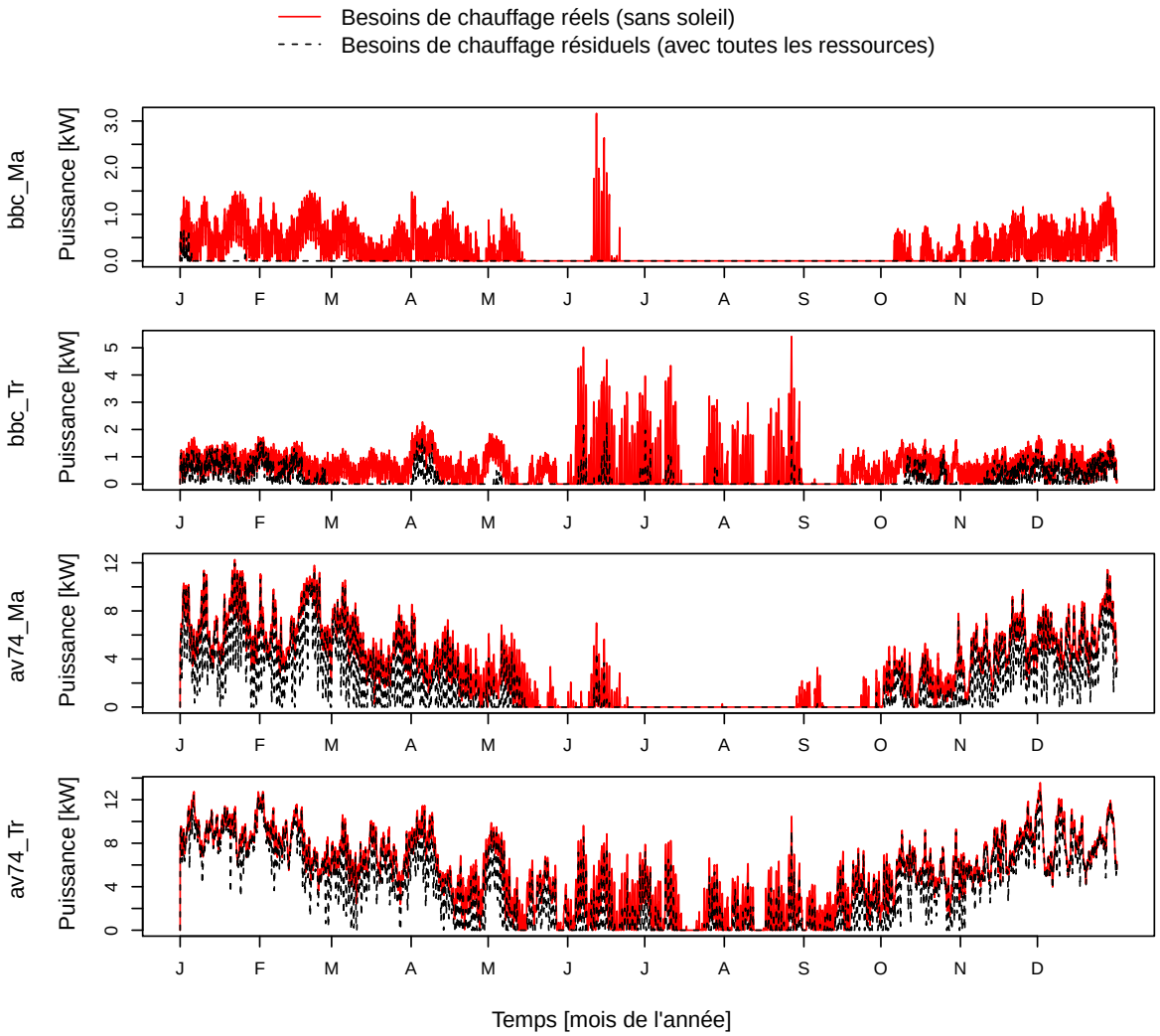

FIGURE 4.22 – Besoins de chauffage réels et résiduels pour le soleil

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.1.1.2 Ciel

Sur la figure 4.23, on a représenté l'évolution des besoins de rafraîchissement réels (sans ciel) et résiduels de la maison INCAS tout au long de l'année dans les différentes configurations. On constate dans tous les cas que la courbe des besoins réels et celle des besoins résiduels sont quasiment superposées. Si l'on excepte les périodes d'hiver et de mi-saison, qui ne représentent pas vraiment un enjeu dans la réduction des besoins de rafraîchissement sous nos latitudes, la comparaison des courbes de besoin est intéressante. Elle nous montre en effet que la version de bâtiment n'a d'impact que sur l'amplitude des courbes mais pas sur leur allure. Les périodes de besoin de rafraîchissement sont les mêmes en version d'avant 1974 comme en version BBC, à Trappes entre mai et août d'une part, et à Marseille entre mai et septembre d'autre part.

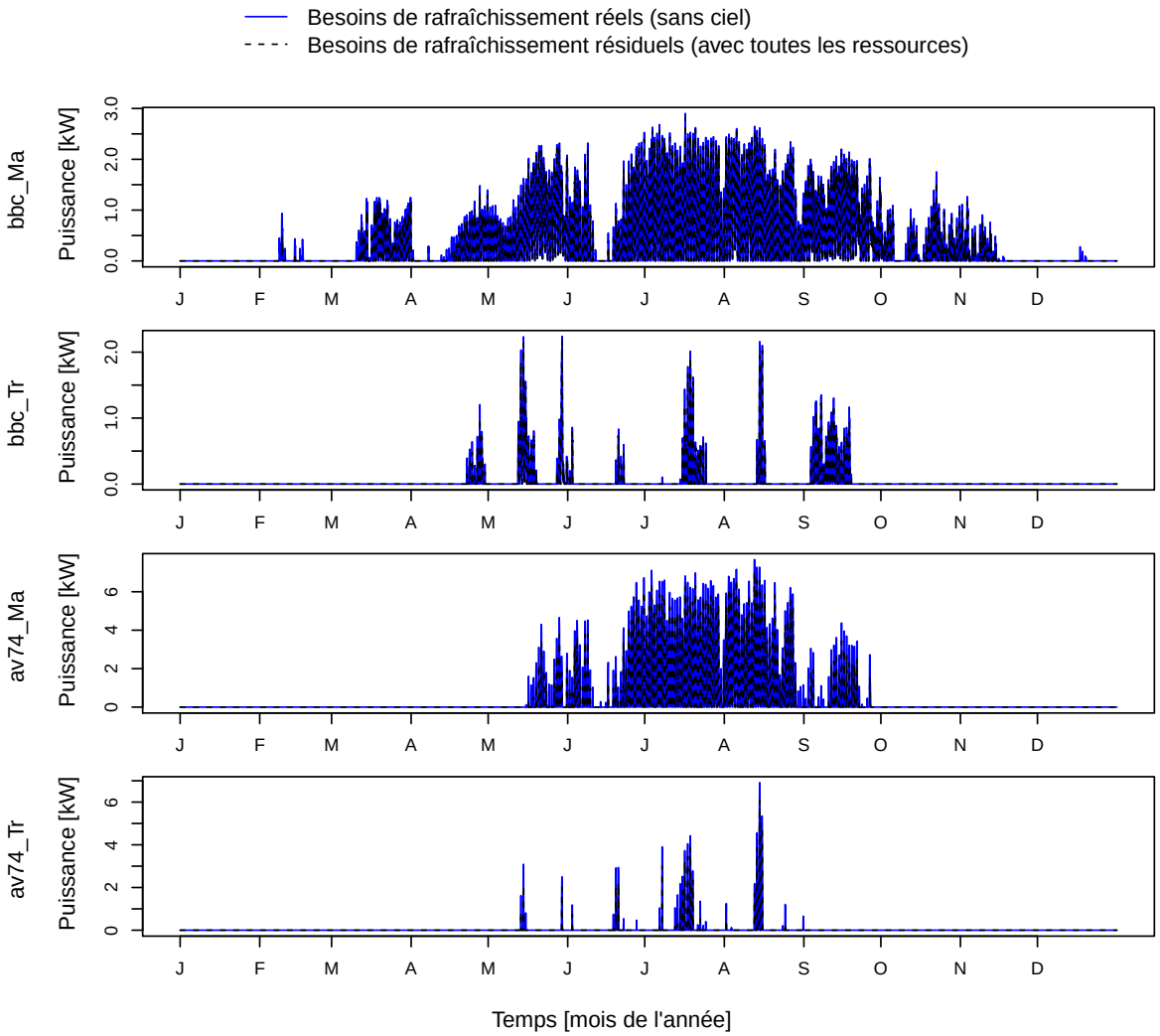

FIGURE 4.23 – Besoins de rafraîchissement réels et résiduels pour le ciel

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.1.1.3 Air

Sur la figure 4.24 sont représentés les besoins de rafraîchissement réels (sans air) et résiduels pour l'air dans les différentes configurations de la maison INCAS. Les conclusions sont très différentes de celles obtenues à partir des résultats pour le soleil et le ciel. En effet, l'allure des courbes de besoin de rafraîchissement réel n'est pas influencée ici par le climat mais bien par le bâtiment. On constate donc qu'en été et en mi-saison (entre mi-avril et mi-octobre), les besoins réels sont similaires à Trappes et à Marseille dans la version BBC. En revanche, on constate que l'allure des courbes de besoin résiduel, qui montre la manière dont le bâtiment utilise l'air extérieur, est la même en été, en BBC et en version d'avant 1974, pour chaque climat. Cela signifie que les périodes où l'air extérieur n'a pas été utilisé pour réduire les besoins sont identiques pour les deux versions de bâtiment. On pourra donc chercher à caractériser ces périodes dans la suite de l'analyse.

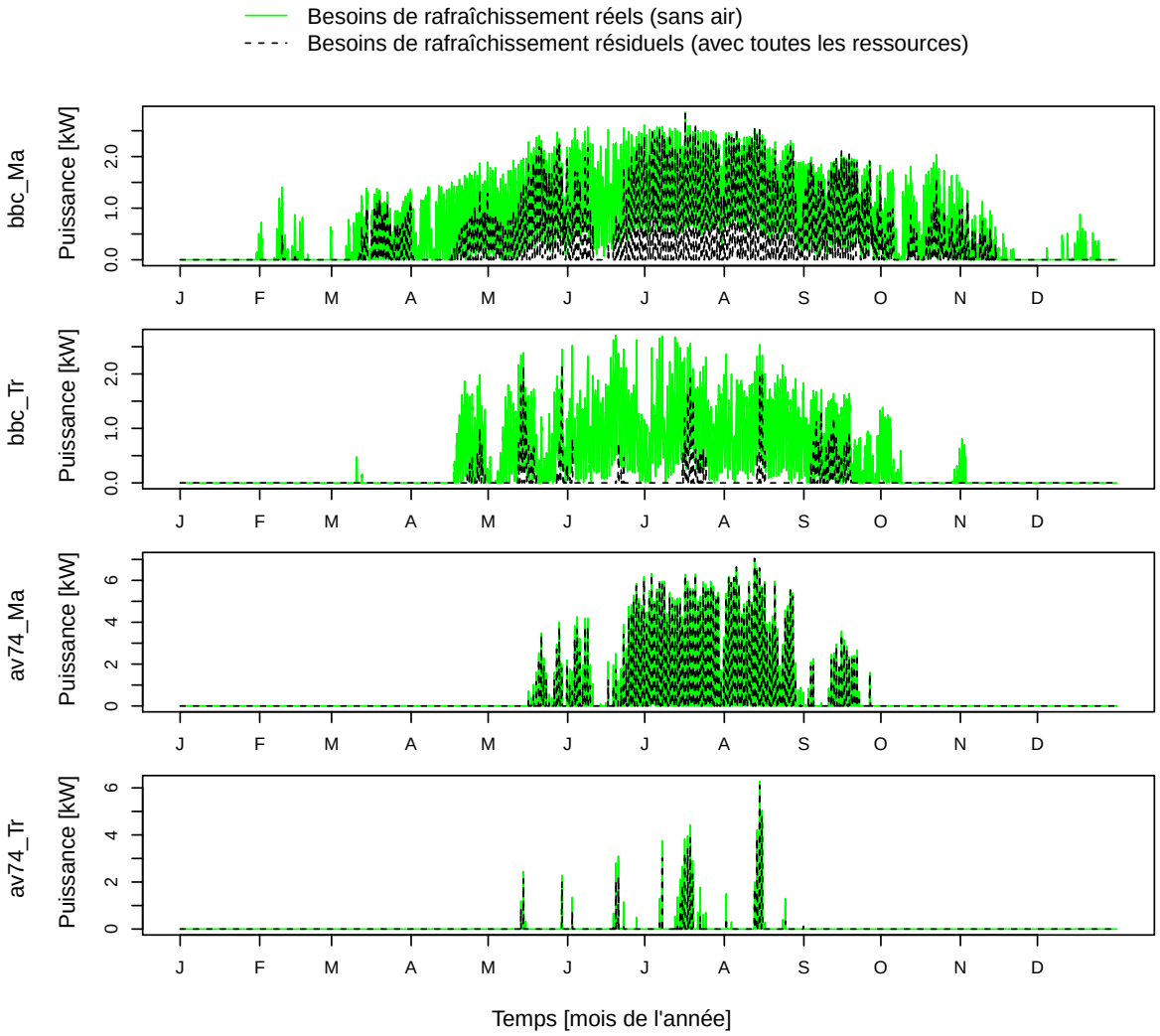

FIGURE 4.24 – Besoins de rafraîchissement réels et résiduels pour l'air

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.1.2 Potentiel des ressources

L'analyse globale a montré qu'il existait une différence importante entre le potentiel total des ressources et leur potentiel concomitant annuel. Ainsi, une grande partie des ressources disponibles n'est pas utile et il peut être intéressant de connaître les périodes concernées. De plus l'analyse globale a révélé que le potentiel ajusté annuel des ressources était la plupart du temps inférieur à leur potentiel concomitant annuel : c'est notamment le cas pour le soleil et pour l'air. Il peut donc être intéressant de connaître les périodes où s'opère cette différence pour évaluer à chaque instant la quantité de ressources en excédent par rapport au besoin. Dans cette partie nous représenterons donc pour chaque ressource l'évolution annuelle de la différence entre deux couples d'indicateurs :

- La différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant représente les périodes où il n'y a pas de besoin réel, et traduit donc l'inutilité du potentiel total.
- La différence entre le potentiel concomitant et le potentiel ajusté traduit en fait la part du potentiel utile à chaque instant mais en excédent par rapport aux besoins.

4.4.1.2.1 Soleil

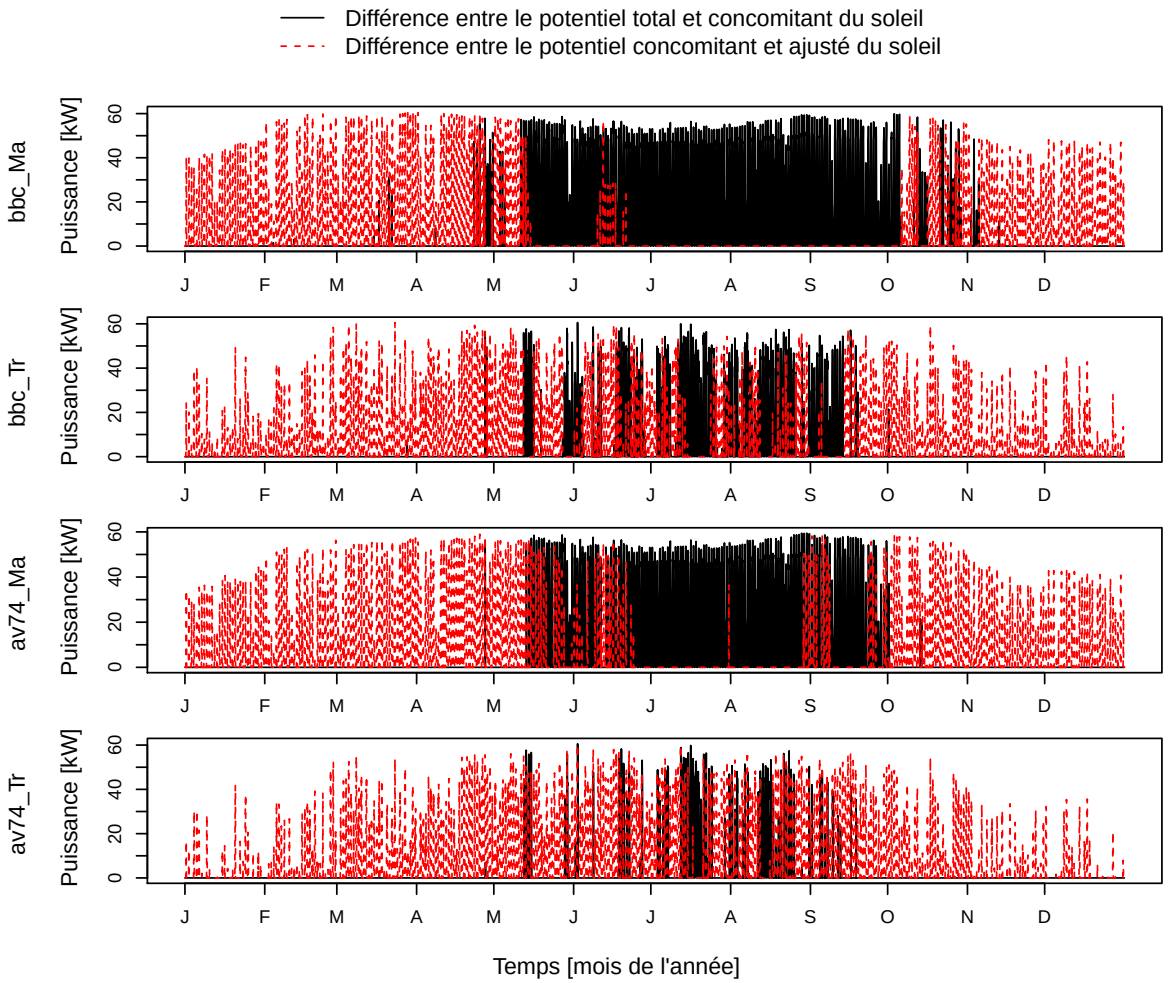

FIGURE 4.25 – Différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant, ainsi qu'entre le potentiel concomitant et le potentiel ajusté du soleil tout au long de l'année

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La figure 4.25 présente l'évolution des différences entre potentiels total et concomitant ainsi qu'entre potentiel concomitant et potentiel ajusté du soleil tout au long de l'année pour les différentes configurations de la maison INCAS. On voit sur cette figure que dans tous les cas, la différence entre potentiel total et potentiel concomitant (en trait plein noir) apparaît principalement l'été. En dehors de cette période, la quasi-totalité du potentiel solaire peut donc être considérée comme utile.

L'évolution de la différence entre potentiel concomitant et ajusté (en trait pointillé rouge) nous indique la quantité de ressource solaire en excédent à chaque instant, dans les périodes où elle est utile. On voit que cette quantité évolue au cours de la période de chauffage : elle est plus faible en plein hiver qu'au début du printemps et qu'à la fin de l'automne. On constate également que cette évolution est principalement liée au climat et non à la version de bâtiment : la part du potentiel en excédent est ainsi plus élevée à Marseille qu'à Trappes, que ce soit pour le bâtiment en version BBC ou en version d'avant 1974.

4.4.1.2.2 Ciel

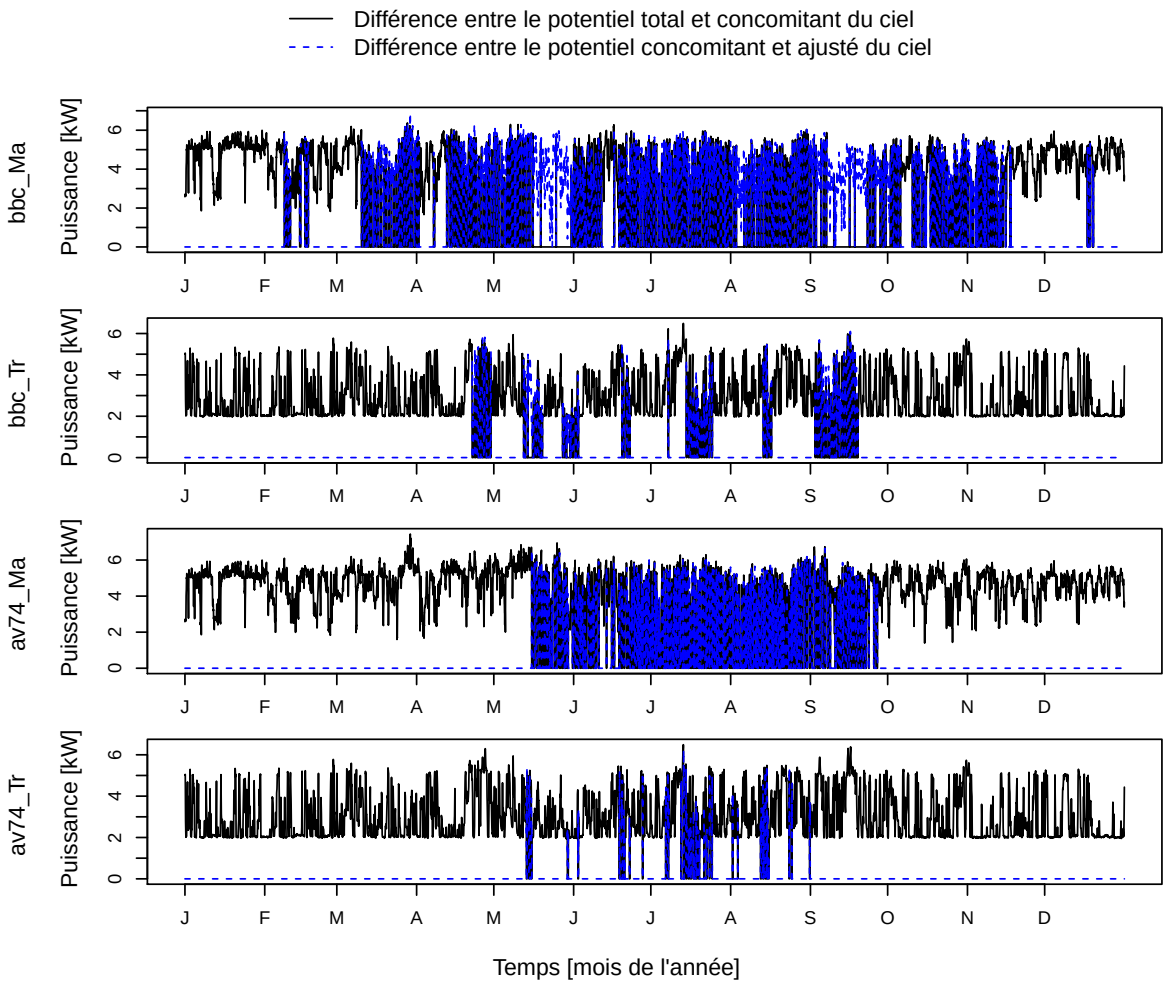

FIGURE 4.26 – Différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant, ainsi qu'entre le potentiel concomitant et le potentiel ajusté du ciel tout au long de l'année

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La figure 4.26 nous présente l'évolution de la différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant, ainsi qu'entre le potentiel concomitant et le potentiel ajusté du ciel tout au long de l'année pour les différentes configurations. La différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant (en trait plein noir) est en fait égale au potentiel total du ciel lorsqu'elle ne s'annule pas. Elle met en évidence le potentiel inutile du ciel qui correspond aux périodes de besoin de rafraîchissement réel nul. Il est intéressant de remarquer que l'ordre de grandeur du potentiel total du ciel est le même pour toutes les configurations. Il est compris entre 2 et 6 kW tout au long de l'année avec une différence selon le climat : à Marseille le potentiel total est le plus souvent proche de 6 kW, alors qu'à Trappes il est le plus souvent proche de 2 kW. Ces valeurs correspondent bien à une différence moyenne annuelle de température entre le ciel et l'air proche de 15°C à Marseille et 5°C à Trappes.

4.4.1.2.3 Air

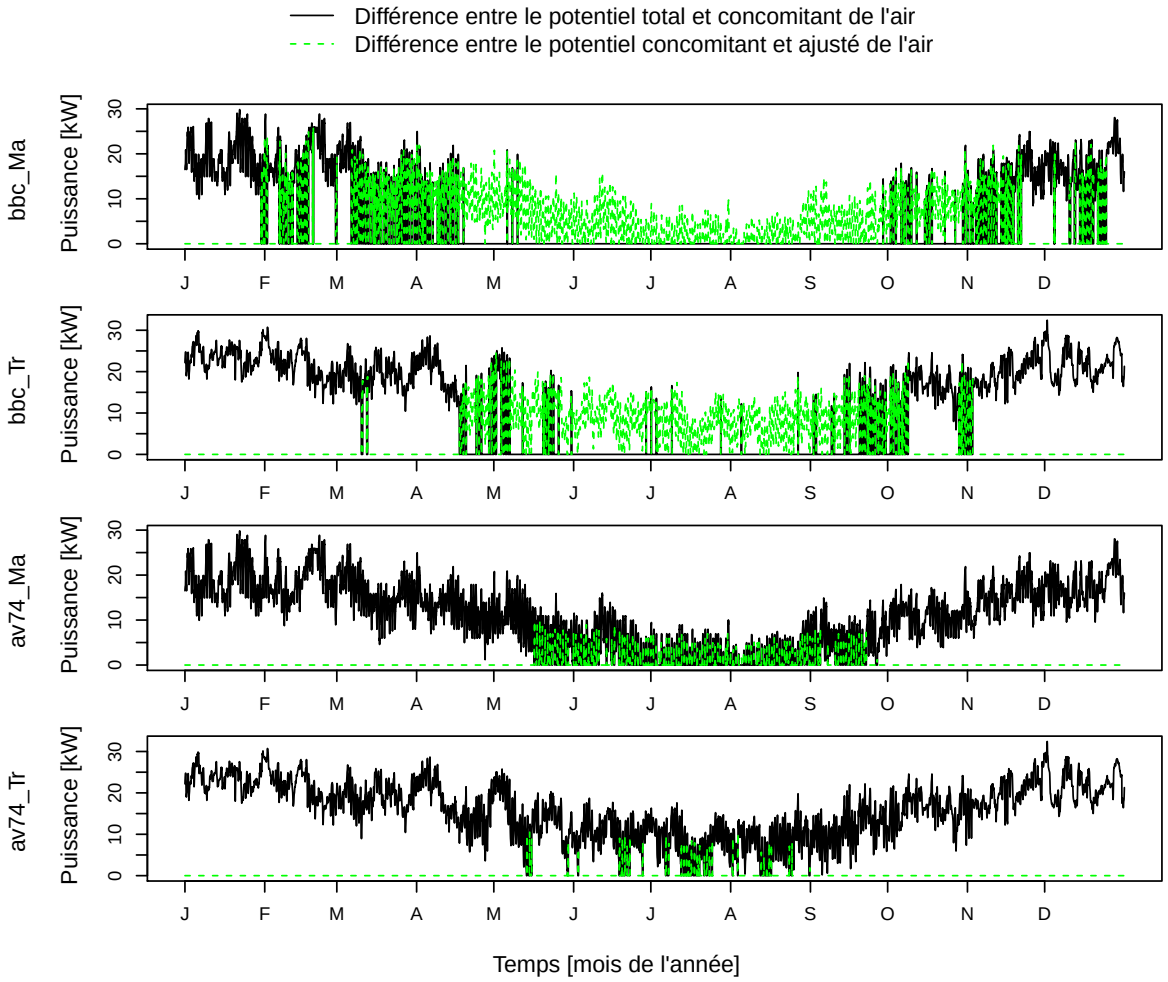

FIGURE 4.27 – Différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant, ainsi qu'entre le potentiel concomitant et le potentiel ajusté de l'air tout au long de l'année

La figure 4.27 présente l'évolution de la différence entre potentiel total et concomitant ainsi qu'entre potentiel concomitant et potentiel ajusté de l'air. En version BBC, la différence entre potentiel total et potentiel concomitant (en trait plein noir) s'opère principalement durant les mois d'hiver (et de mi-saison à Trappes). Ainsi, durant la période de rafraîchissement, c'est-à-dire principalement en été, la totalité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

du potentiel de l'air extérieur est utile en version BBC. Dans les versions d'avant 1974, la différence entre potentiel total et potentiel concomitant ne s'annule presque pas tout au long de l'année et suit une évolution sinusoïdale qui atteint son maximum en hiver et son minimum en été. Ainsi, même en été, une part importante du potentiel total de l'air n'est pas utile. Il pourra être intéressant de comprendre pourquoi.

La différence entre potentiel concomitant et potentiel ajusté (en trait pointillé vert) montre la part du potentiel de l'air en excédent en période de rafraîchissement. On constate ainsi que, dans toutes les versions, le potentiel de l'air est en excès, même en période de rafraîchissement.

Pour mieux comprendre d'où vient la différence entre le potentiel total et le potentiel concomitant en été, en période de besoins de rafraîchissement, on compare le cas d'une séquence dans les deux climats pour la version d'avant 1974 de la maison INCAS sur la figure 4.28. On constate que, lorsque les besoins de rafraîchissement existent (premiers jours de la séquence à Trappes et sur toute la séquence à Marseille), il s'annulent quotidiennement pendant la journée, notamment en début de matinée lorsque le potentiel total de l'air atteint son maximum., ce qui explique qu'une partie importante du potentiel de l'air soit inutile même en période de besoins de rafraîchissement.

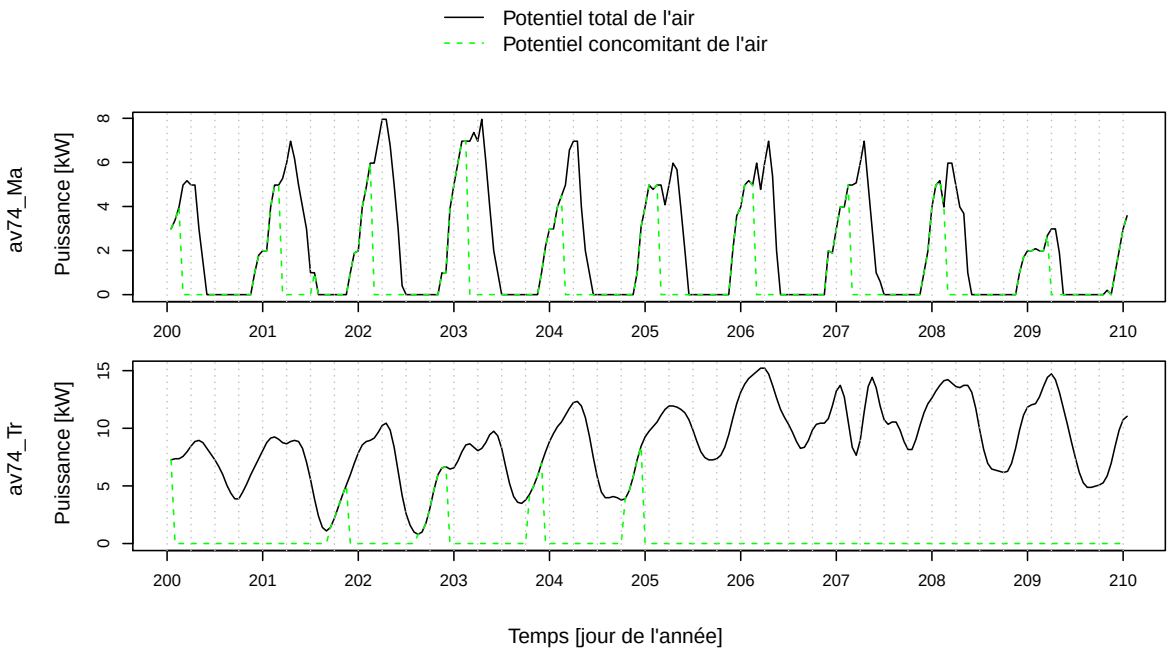

FIGURE 4.28 – Potentiel total et concomitant de l'air sur une séquence d'été

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.1.3 Potentiel exploité des ressources

Après avoir caractérisé la répartition des besoins et du potentiel des ressources sur toute l'année, il peut être intéressant d'observer l'évolution du potentiel exploité des ressources et de la comparer aux deux indicateurs précédents.

4.4.1.3.1 Soleil

La figure 4.29 montre l'évolution du potentiel exploité du soleil sur une séquence de dix jours en hiver. Sur cette même figure, on a représenté également le potentiel concomitant du soleil ainsi que les besoins de chauffage réels, et ce pour les différentes configurations de la maison INCAS. En observant la courbe du potentiel exploité, on distingue deux comportements selon la version de bâtiment : BBC ou avant 1974.

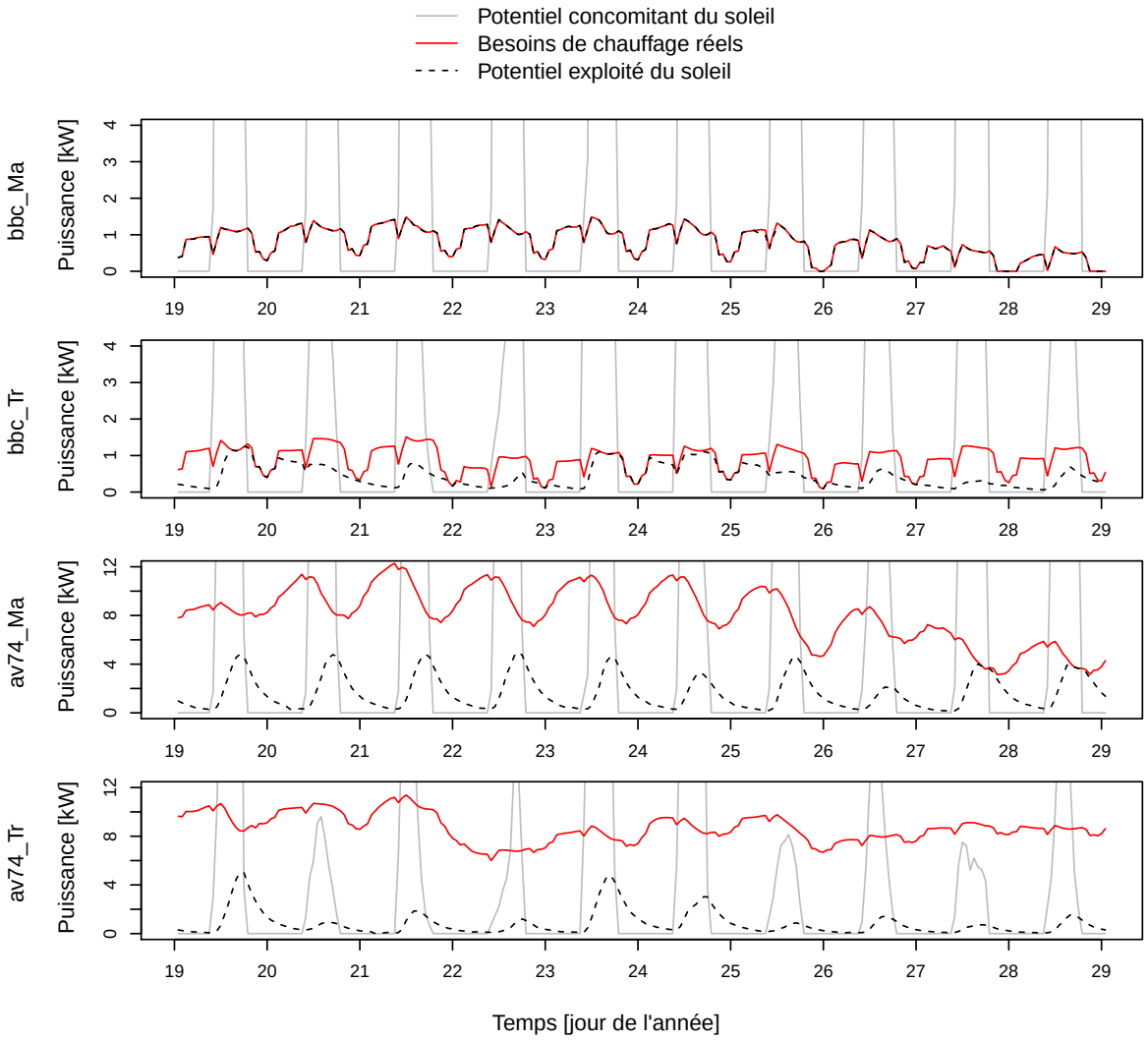

FIGURE 4.29 – Potentiels concomitant et exploité du soleil et besoins de chauffage sans soleil en hiver

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Dans le cas de la maison d'avant 1974, l'allure de la courbe du potentiel exploité suit un comportement typique d'un cycle de charge/décharge (chargement la journée et déchargement la nuit). Ainsi le bâtiment est toujours complètement déchargé en fin de nuit, que le potentiel solaire soit élevé ou non (deuxième, septième et neuvième jour à Trappes). Ce comportement peut s'expliquer par la conjonction de deux éléments : d'une part, les besoins de chauffage sont importants, le taux de puisage sur le stock est donc lui aussi élevé, et d'autre part, les parois n'étant pas isolées, une partie importante de l'énergie qui y est stockée est perdue vers l'extérieur. Dans le bâtiment BBC, le profil est différent. En effet, le scénario d'occupation apporte des charges internes dont les puissances sont de l'ordre des besoins de chauffage. Ainsi, en fin d'après-midi, les charges internes augmentent et les besoins diminuent. En conséquence, le potentiel exploité décroît également. En fin de soirée, sous l'effet de la diminution des charges internes, les besoins augmentent à nouveau, et si le bâtiment n'est pas totalement déchargé (c'est le cas lorsque la journée a été ensoleillée), alors le potentiel solaire peut connaître un sursaut d'exploitation bien qu'il n'y ait alors aucune ressource concomitante. On remarque en outre qu'à la fin de chaque cycle de 24 heures, le potentiel exploité n'est pas nul. Cela indique que le stock thermique ne se vide jamais et que chaque jour d'apport solaire supplémentaire recharge sans cesse un stock qui ne fait que croître.

Ces comportements montrent donc que la concomitance des ressources aux besoins est une vision théorique utile, qui permet de définir une forme d'utilité de la ressource, mais qu'en pratique, elle masque une partie de la réalité. La ressource solaire n'est pas totalement exploitée instantanément lorsqu'elle existe et elle peut être exploitée avec retard quand la ressource a disparu. Cela est possible sans équipement spécifique, uniquement par le biais de l'inertie du bâtiment. Ce comportement peut également être géré par l'intermédiaire d'un système de stockage, qui sera d'autant plus simple à concevoir et à exploiter que les périodes de stockage seront courtes et les puissances à délivrer seront faibles. De plus, le comportement cyclique du potentiel exploité qui rappelle celui de la ressource solaire, mais en décalé, (au moins dans le cas des bâtiments d'avant 1974) nous incite à rechercher la valeur du retard caractéristique d'exploitation pour un bâtiment donné. Dans l'esprit, ce retard peut être considéré comme le temps au bout duquel la ressource est exploitée avec le plus d'efficacité par le bâtiment. Cette recherche sera effectuée dans la suite, à l'aide de la méthode d'inter-corrélation entre signaux.

4.4.1.3.2 Ciel

Le comportement du bâtiment par rapport au ciel (figure 4.30) ne suit pas du tout le même schéma que pour le soleil. En effet, le ciel n'étant pas une source de rafraîchissement intermittente, son potentiel concomitant est uniquement limité dans le temps par les besoins de rafraîchissement réels. Besoins et potentiel concomitant sont donc en phase. On voit également que les besoins et le potentiel exploité sont en phase. Ce phénomène s'explique simplement par le fait que le potentiel exploité, qui semble relativement constant lorsqu'il n'est pas nul (courbe en créneau), est borné par les besoins de rafraîchissement réels. Sa concomitance, de fait, avec le potentiel concomitant du ciel, ne permet donc pas de conclure à une quelconque immédiateté d'exploitation de la ressource par le bâtiment.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

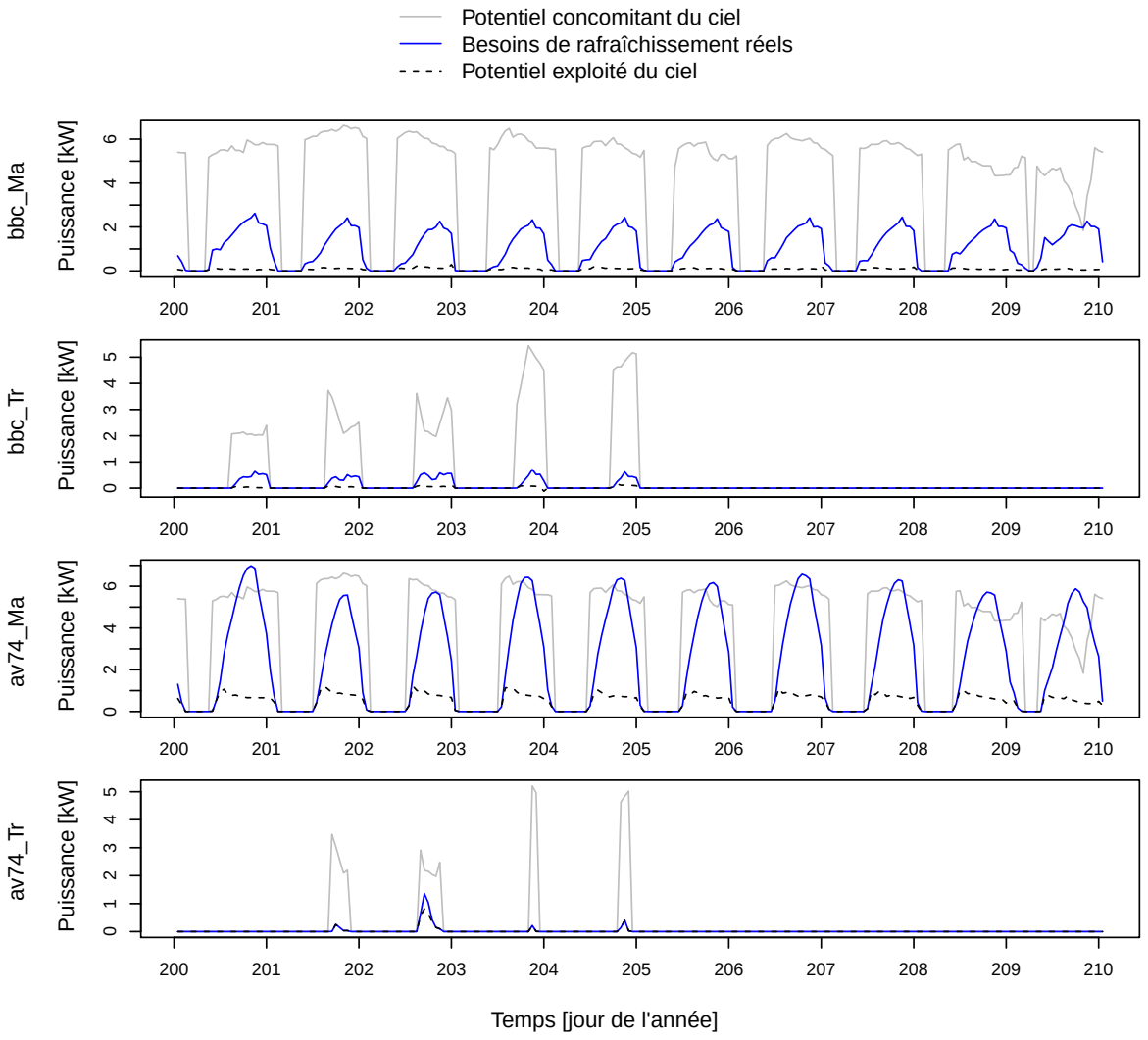

FIGURE 4.30 – Potentiels concomitant et exploité du ciel et besoins de rafraîchissement sans ciel en été

4.4.1.3.3 Air

Le comportement dynamique des indicateurs pour l'air (figure 4.31) est très dépendant du type de climat. À Trappes, les besoins de rafraîchissement réels sont relativement faibles et surtout très inférieurs au potentiel concomitant de l'air qui ne s'annule presque jamais lorsque les besoins existent. Ainsi, la courbe du potentiel exploité de l'air est très proche de celle des besoins de rafraîchissement réels et suit un cycle journalier, avec un minimum à l'aube lorsque le potentiel de l'air atteint son maximum.

Dans le climat de Marseille, le comportement est différent. De la même manière que pour le soleil, on observe un cycle de stockage/déstockage dans l'allure de la courbe du potentiel exploité. La phase de charge semble assez rapide (pente très forte) avec un léger décalage par rapport au potentiel concomitant (démarrage au milieu de la nuit). La courbe de décharge, quant à elle, est bornée en valeur par celle des besoins réels (qui s'annulent même sur cette séquence dans la version d'avant 1974). Dans tous les cas le stock semble assez faible et se vide complètement à la fin de chaque cycle quotidien.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

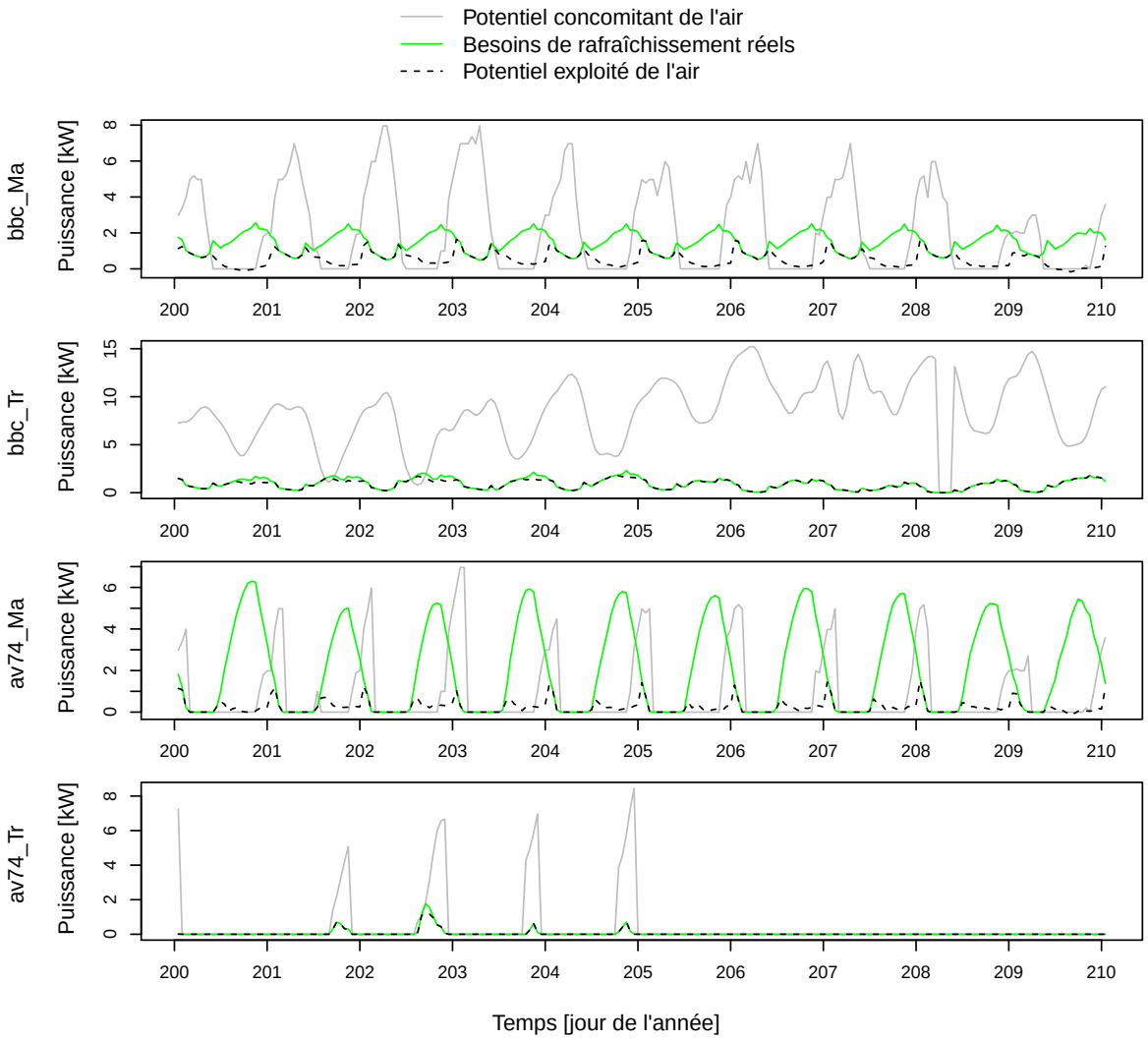

FIGURE 4.31 – Potentiels concomitant et exploité de l'air et besoins de rafraîchissement sans air en été

Comme pour le soleil, il peut être intéressant de pousser un peu plus loin cette analyse. D'une part, on peut examiner la corrélation entre la courbe du potentiel concomitant et celle du potentiel ajusté afin de déterminer le retard caractéristique s'il existe. D'autre part, il est possible de caractériser les périodes de manque (potentiel inférieur au besoin réel) et les périodes d'exploitation sans potentiel (potentiel exploité supérieur au potentiel concomitant) afin de déterminer les caractéristiques d'un éventuel système de stockage.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.2 Retard caractéristique d'exploitation des ressources

La section précédente a montré que les ressources n'étaient pas toujours exploitées de manière instantanée, et que dans certains cas on observait un décalage net entre la courbe du potentiel concomitant et celle du potentiel exploité. Ces observations nous incitent à rechercher, pour chaque ressource, l'existence d'un « retard caractéristique d'exploitation » qui traduirait en fait le temps de réponse du bâtiment à la sollicitation des différentes ressources. Dans la démarche classique, basée sur l'observation des besoins résiduels, ce temps caractéristique est difficile à évaluer car les besoins résiduels sont le résultat de plusieurs sollicitations. L'avantage du potentiel exploité d'une ressource est d'être uniquement lié à la ressource en question.

4.4.2.1 Inter-corrélation entre deux signaux

L'analyse de l'inter-corrélation (ou corrélation croisée) entre deux signaux permet de mesurer le degré de similitude entre ces signaux, décalés dans le temps l'un par rapport à l'autre. La dépendance entre deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ décalés d'un temps τ est donnée par la fonction d'inter-corrélation :

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t-\tau)dt \tag{4.3}$$

Si cette fonction présente un maximum marqué, la valeur de τ correspondant est la valeur du décalage le plus significatif entre les fonctions x et y, donc la durée de stockage la plus profitable. Dans le cas de mesures discrètes, il faut remplacer le calcul d'intégrale par une somme et limiter le temps d'intégration aux nombre de données disponibles. Dans la pratique, les données sont centrées et réduites et la fonction de corrélation est comprise entre -1 et 1.

4.4.2.2 Application au potentiel concomitant et exploité des ressources

Cette méthode est applicable à tout type de signaux temporels. On peut donc analyser les inter-corrélations entre les différents indicateurs définis à chaque instant. On a vu à la section précédente que l'exploitation des ressources n'était pas toujours instantanée. La méthode de recherche des inter-corrélations entre signaux va alors pouvoir nous permettre de déterminer par exemple le retard caractéristique d'exploitation du potentiel des ressources par le bâtiment. Pour ce faire, on peut analyser les inter-corrélations entre le potentiel concomitant des ressources et le potentiel exploité.

4.4.2.2.1 Soleil

L'évolution des potentiels concomitant et exploité du soleil par la maison INCAS dans les différentes configurations est représentée pour toute l'année sur la figure 4.32 et l'analyse des inter-corrélations entre ces deux potentiels est réalisée sur la figure 4.33.

La figure 4.33 montre deux résultats bien distincts selon la version de bâtiment. Pour la version BBC, le pic d'inter-corrélation ne dépasse pas 0.4, ce qui ne nous permet pas de déterminer avec certitude le retard caractéristique d'exploitation du soleil de ce bâtiment. Cette durée est en effet très fortement liée à la décharge du stock : comme le stock d'énergie ne se décharge jamais complètement en version BBC, on ne peut pas déterminer avec certitude la part du potentiel exploité à partir du potentiel concomitant, de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

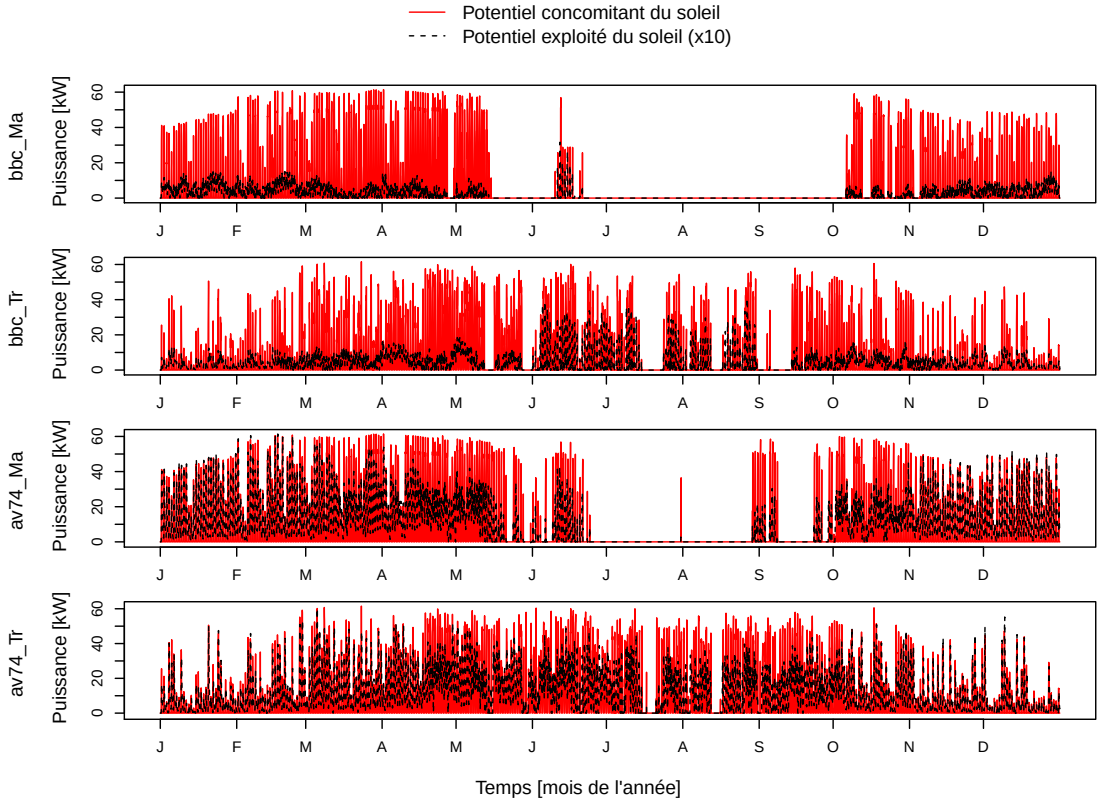

FIGURE 4.32 – Potentiel concomitant et potentiel exploité du soleil

la part du potentiel exploité à partir du stock. Le retard caractéristique d'exploitation du potentiel solaire par les bâtiments BBC est donc très variable et ne peut pas être déterminé dans cette analyse.

En revanche, en ce qui concerne la version d'avant 1974 de la maison INCAS, le pic d'inter-corrélation dépasse 0.5 à Trappes et même 0.6 à Marseille. Il est atteint dans les deux cas pour un retard de deux heures. Ces résultats montrent que le potentiel solaire est exploité avec le plus d'efficacité, avec en moyenne deux heures de retard, quel que soit le climat.

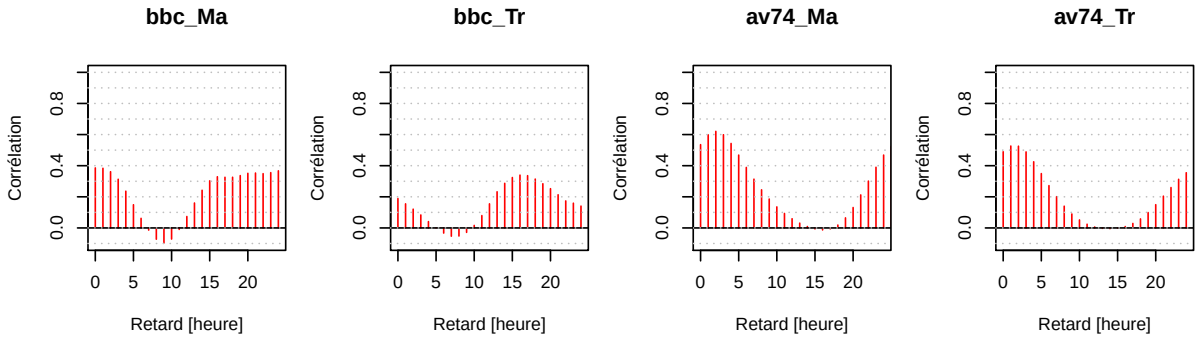

FIGURE 4.33 – Analyse des inter-corrélations entre le potentiel concomitant et le potentiel exploité du soleil

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.2.2.2 Ciel

La figure 4.34 montre l'évolution du potentiel concomitant et du potentiel exploité du ciel sur toute l'année dans les différentes configurations de la maison INCAS, et la figure 4.35 présente l'analyse des inter-corrélations entre ces deux signaux.

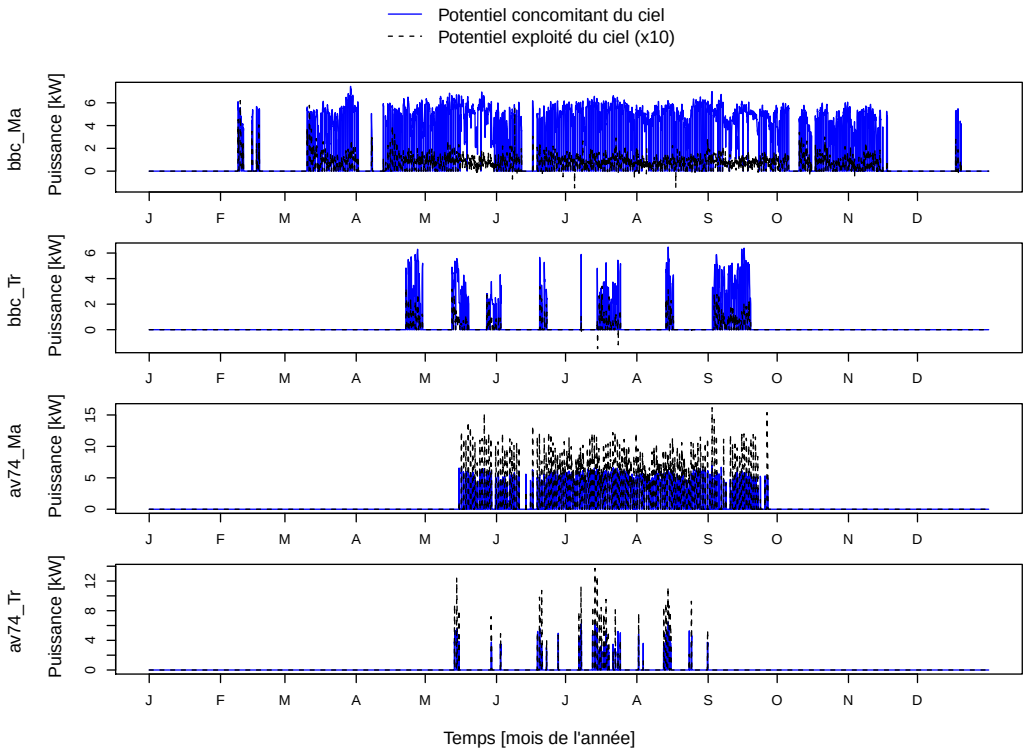

FIGURE 4.34 – Potentiel concomitant et potentiel exploité du ciel

Dans tous les cas, le pic d'inter-corrélation est très élevé (entre 0.8 et 0.9) et correspond à un retard nul. Cette analyse ne fait que confirmer l'examen des courbes à la section précédente, qui montrait un potentiel exploité en phase avec le potentiel concomitant du ciel. La potentiel concomitant du ciel n'étant cependant pas intermittent, cela ne nous permet pas réellement de conclure à un temps caractéristique d'exploitation nul.

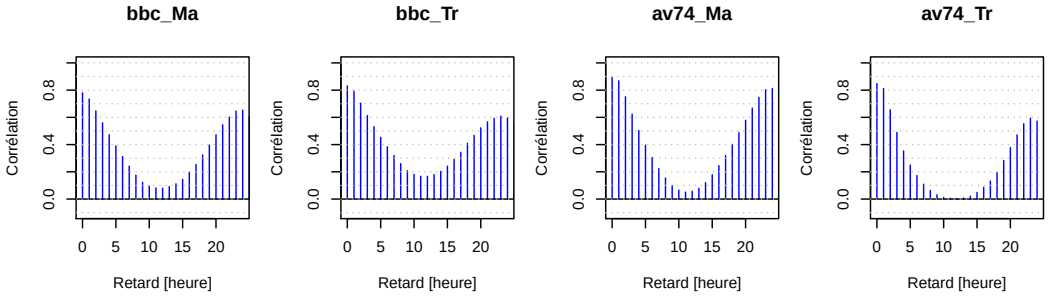

FIGURE 4.35 – Analyse des inter-corrélations entre le potentiel concomitant et le potentiel exploité du ciel

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.2.2.3 Air

Les courbes des potentiels concomitant et exploité de l'air dans les différentes configurations de la maison INCAS sont représentées sur la figure 4.36 et l'analyse des inter-corrélations entre ces courbes est réalisée sur la figure 4.37.

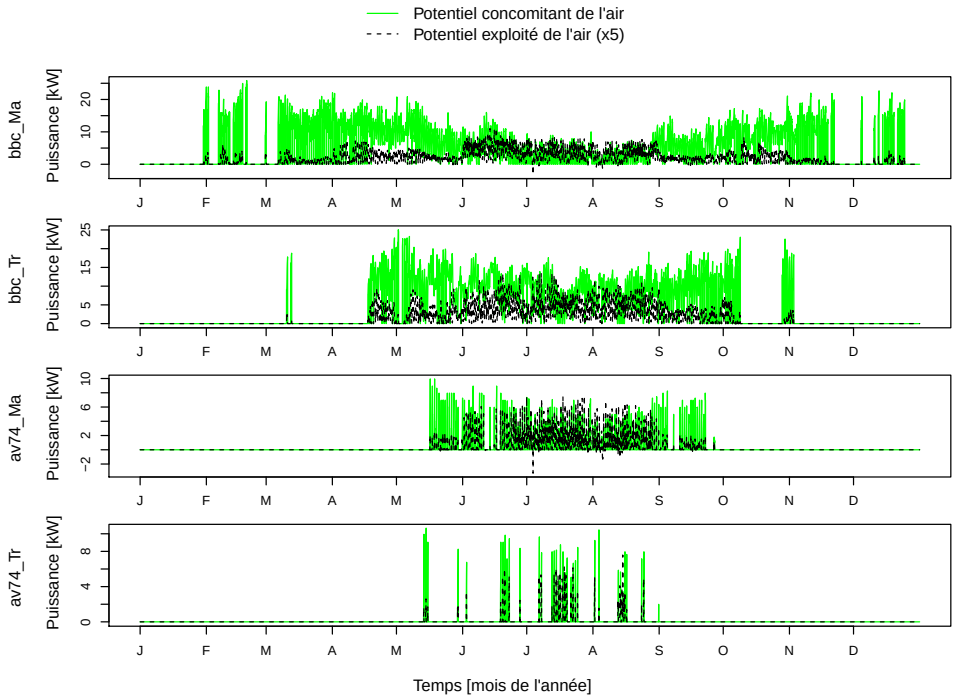

FIGURE 4.36 – Potentiel concomitant et potentiel exploité de l'air

Pour la maison BBC à Marseille, le pic d'inter-corrélation est très faible (inférieur à 0.3) et ne peut pas être interprété. On se souvient en effet, que la courbe du potentiel exploité était limitée par celle des besoins réels, ce qui impliquait une exploitation en deux temps. Il est donc difficile de définir un retard caractéristique pour cette configuration. À Trappes, en revanche, l'analyse des inter-corrélations donne un retard d'exploitation de l'air par la maison BBC de 16 heures. Le pic de corrélation est alors proche de 0.6. Pour les deux versions d'avant 1974 le schéma est différent. On observe en fait deux pics de corrélations : le premier correspond à un retard nul, tandis que le second correspond à un retard de près de 23 heures. Ce constat laisse à penser que l'exploitation du potentiel de l'air est double : d'une part le bâtiment exploite instantanément l'air extérieur, et d'autre part on peut penser que le bâtiment exploite une partie du potentiel de la veille en début de cycle nocturne.

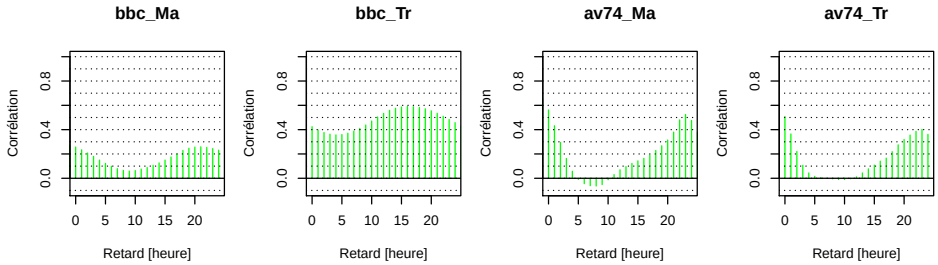

FIGURE 4.37 – Analyse des corrélations croisées entre le potentiel concomitant et le potentiel exploité de l'air

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.3 Caractérisation des périodes de manque et de surexploitation des ressources

La vision dynamique montre donc qu'il y a des périodes pendant lesquelles le potentiel concomitant est inférieur au besoin. Durant ces périodes, il est donc impossible (même en exploitant instantanément toute la ressource disponible) de couvrir le besoin avec la ressource. Cependant, on peut aussi montrer que par le biais des moyens de stockage (ici principalement l'inertie du bâtiment), il y a aussi des périodes pendant lesquelles le potentiel exploité est supérieur au potentiel concomitant. Deux situations peuvent donc être identifiées :

- Les périodes de déficit : le potentiel concomitant est inférieur aux besoins réels du bâtiment.
- Les périodes de surexploitation : le potentiel exploité est supérieur au potentiel concomitant.

Il peut être intéressant de comparer la distribution de ces deux types de périodes dans chaque situation afin d'identifier les points critiques qui expliquent que les ressources ne couvrent pas tous les besoins. Pour cela, nous allons dans la suite caractériser les périodes définies précédemment ($Pconc_{C,s} < B_{C,s}$ et $Pexp_{C,s} > Pconc_{C,s}$) en termes de :

- durée maximale,
- puissance moyenne (nécessaire et exploitée),
- puissance maximale (nécessaire et exploitée).

4.4.3.1 Soleil

Les figures 4.38, 4.39, 4.40 et 4.41 présentent la caractérisation des périodes de déficit (points noirs) et de surexploitation du potentiel du soleil (croix rouges) dans toutes les configurations de la maison INCAS. L'analyse de ces figures va se concentrer sur la période de chauffage étendue, c'est-à-dire entre les mois d'octobre et d'avril. Ces mois correspondent, en effet, à la période où le potentiel solaire est toujours utile. Deux comportements sont identifiables selon qu'on soit dans la configuration BBC ou bien dans celle d'avant 1974.

Dans la version BBC (figures 4.38 et 4.39), à Marseille comme à Trappes, les durées caractérisant les périodes de déficit les plus longues sont comprises entre 15 et 18 heures et se retrouvent en plein hiver. Dans les deux cas, la plupart du temps, ces longues périodes de déficit peuvent être compensées aux mêmes instants par des durées de surexploitation équivalentes. La longueur des périodes où le potentiel du soleil est inférieur au besoin de chauffage réel ne pose donc pas de réel problème dans ces deux cas.

Lorsqu'on s'attache aux puissances moyennes et maximales, on observe une différence selon que l'on soit à Marseille ou à Trappes. À Marseille, les puissances les plus importantes, correspondant aux périodes déficitaires en potentiel solaire, se retrouvent également en hiver et elles peuvent être compensées dans la majorité des cas par des puissances équivalentes lors des périodes de surexploitation. À Trappes, en hiver, les puissances correspondant aux périodes de déficit sont plus importantes que les puissances en période de surexploitation du soleil. On observe en général un facteur 2 entre les deux. Ainsi, si les périodes de déficit du potentiel solaire sont bien compensées en BBC à Trappes par des périodes de durée équivalente, elles ne sont néanmoins pas compensées en puissance.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

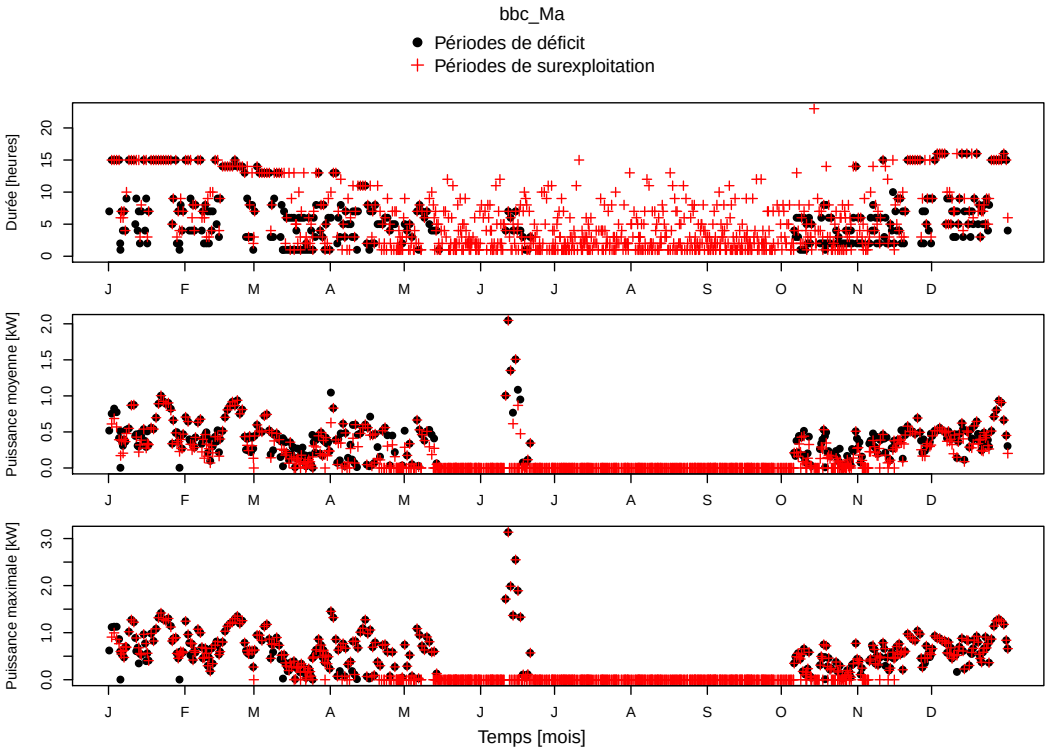

FIGURE 4.38 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel solaire par la maison INCAS en version BBC à Marseille

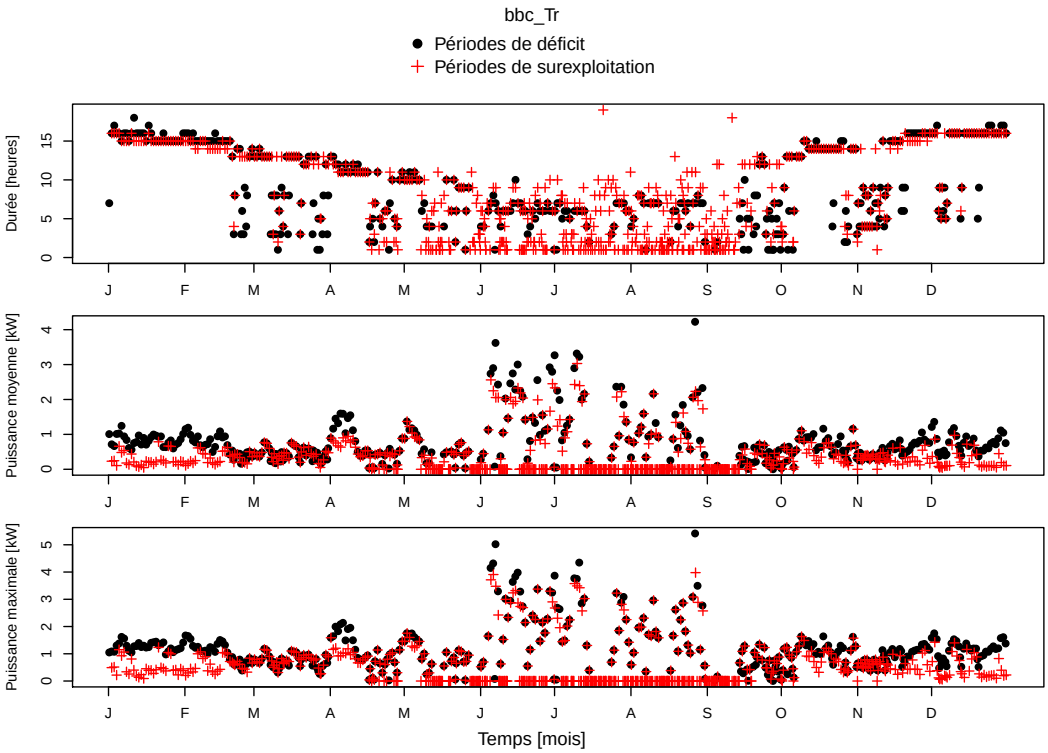

FIGURE 4.39 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel solaire par la maison INCAS en version BBC à Trappes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les effets observés sur les bâtiments BBC sont amplifiés lorsqu'on observe les résultats obtenus pour les bâtiments en version d'avant 1974 (figures 4.40 et 4.41). En effet, si les courbes représentant les durées des périodes de déficit et de surexploitation sont semblables dans chaque cas, elles ne se superposent pas pour autant. En hiver, la durée des périodes de surexploitation du potentiel solaire est inférieure à la durée de la période de déficit de potentiel d'environ deux heures à Marseille et d'environ cinq heures à Trappes. On remarque même sur la figure 4.41 (en haut) que certaines périodes de déficit durent jusqu'à trois ou quatre jours. Ces dernières ne sont évidemment pas compensées par des périodes de surexploitation de durée équivalente.

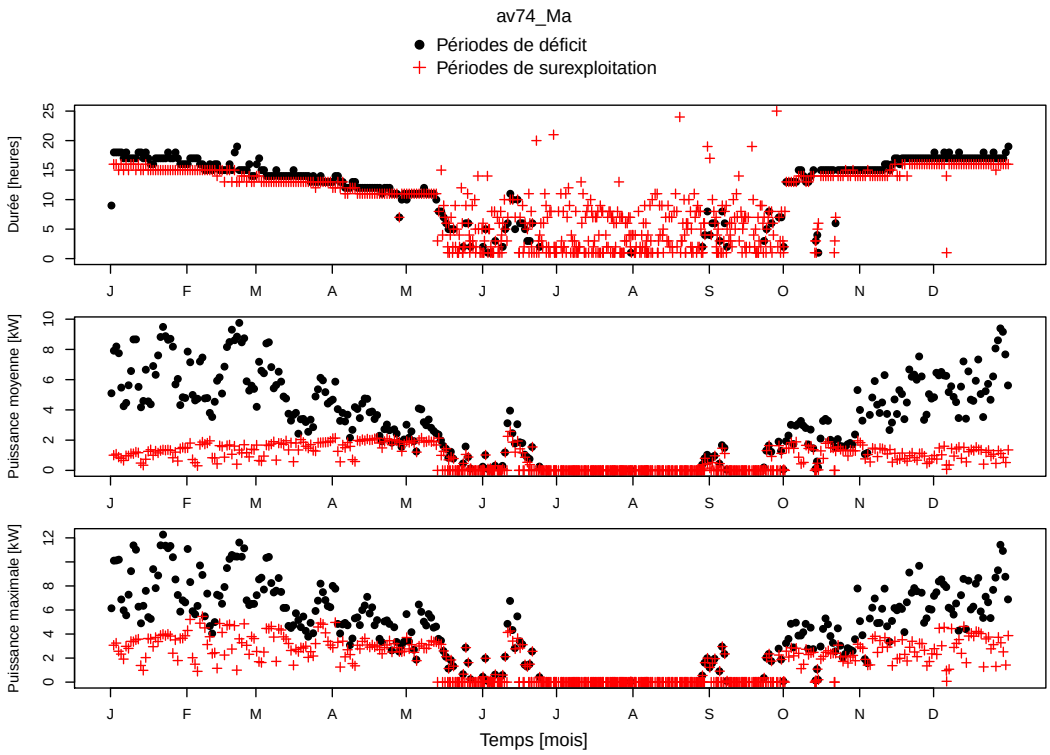

FIGURE 4.40 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel solaire par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Marseille

L'examen des courbes de puissances montre la même tendance qu'en BBC, à savoir que les puissances correspondant aux périodes de déficit sont toujours supérieures aux puissances correspondant aux périodes de surexploitation en hiver, mais cette fois-ci l'ordre de grandeur de la différence est proche de 10. Ces résultats montrent donc que lorsqu'on passe d'un bâtiment non isolé à un bâtiment BBC, on réduit non seulement les puissances de chauffage et donc la différence entre besoins de chauffage et potentiel solaire, mais également la durée des périodes de manque de potentiel ce qui permet peut-être d'envisager des solutions de stockage moins lourdes (en utilisant par exemple l'inertie du bâtiment).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

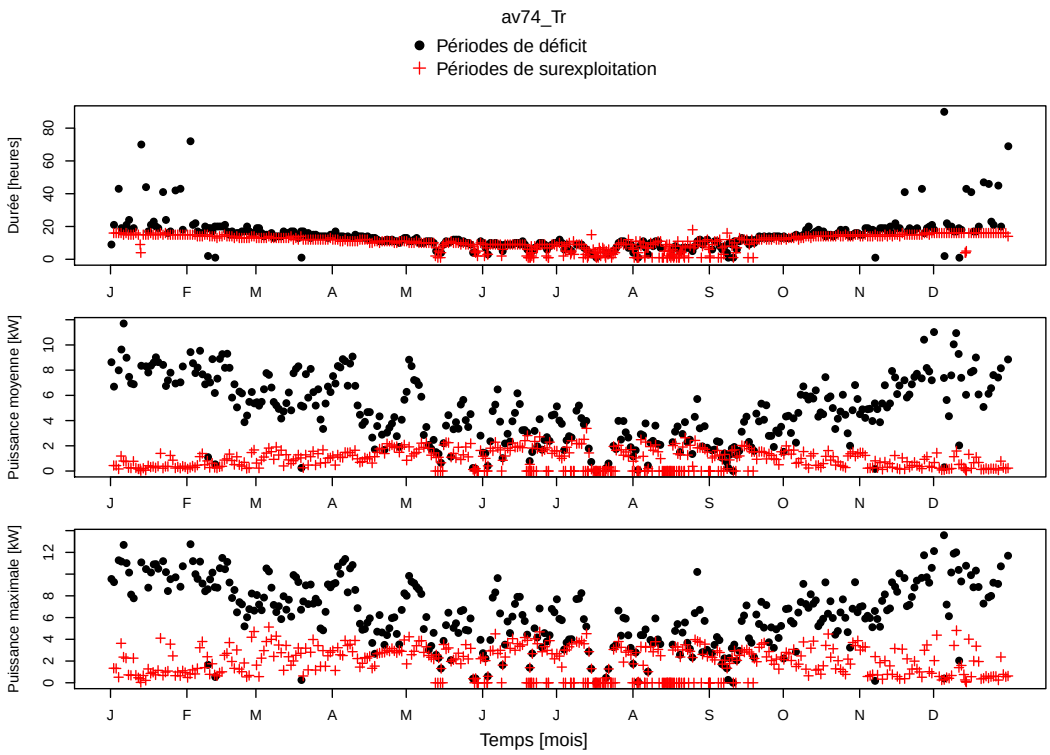

FIGURE 4.41 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel solaire par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Trappes

4.4.3.2 Ciel

La caractérisation des périodes de déficit (points noirs) et de surexploitation du potentiel du ciel (croix bleues) dans toutes les configurations de la maison INCAS est présentée sur les figures 4.42, 4.43, 4.44 et 4.45. L'analyse de ces figures va essentiellement porter sur la période estivale (juin à septembre) où ont été identifiés des besoins de rafraîchissement dans les parties précédentes.

Mis à part le cas de la maison en version d'avant 1974 à Marseille, on peut remarquer que les périodes de déficit sont très peu nombreuses (moins d'une dizaine en version d'avant 1974 à Trappes, quatre en version BBC à Marseille, et même zéro à Trappes en BBC). On a vu en effet précédemment que le ciel n'était pas une ressource intermittente : les périodes de déficit sont donc simplement celles où les besoins de rafraîchissement sont supérieurs à son potentiel (contrairement au soleil où les périodes de déficit correspondent souvent à des périodes d'absence de potentiel). Dans la version d'avant 1974 à Marseille ces périodes sont beaucoup plus nombreuses (une cinquantaine d'occurrences) mais dans tous les cas, la durée maximale de ces périodes est assez faible. Elle est comprise entre cinq et dix heures en configuration d'avant 1974 et inférieure à cinq heures en BBC. On voit surtout que, dans toutes les configurations, ces périodes de déficit sont comblées par des périodes de surexploitation d'une durée équivalente ou supérieure.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

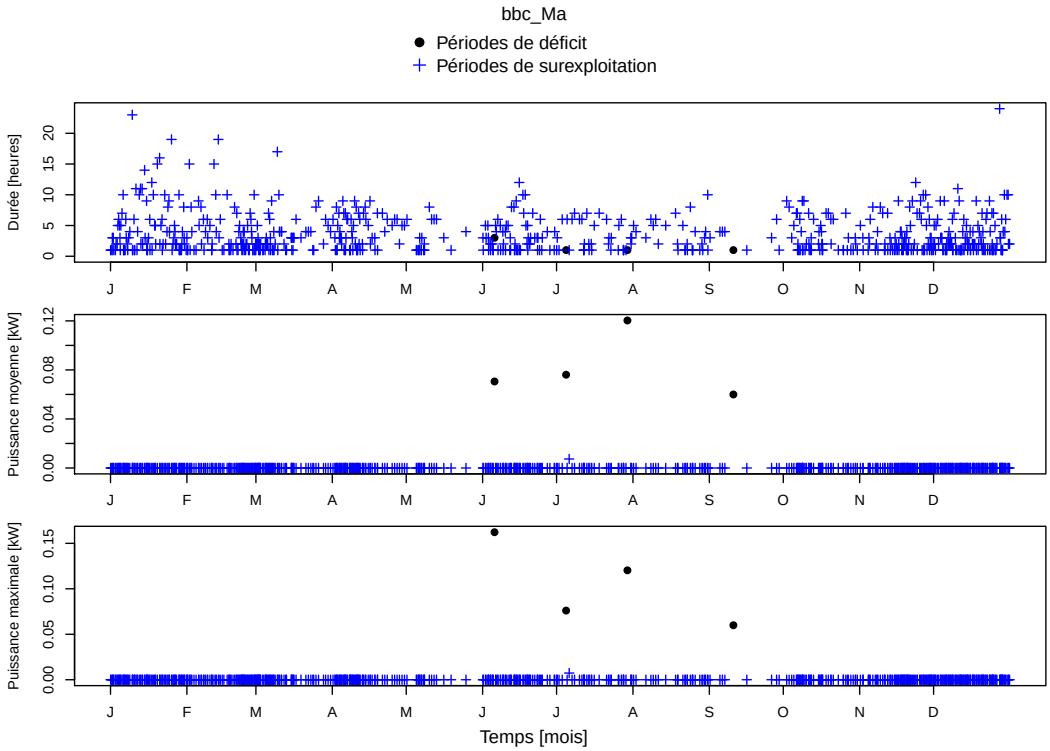

FIGURE 4.42 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel du ciel par la maison INCAS en version BBC à Marseille

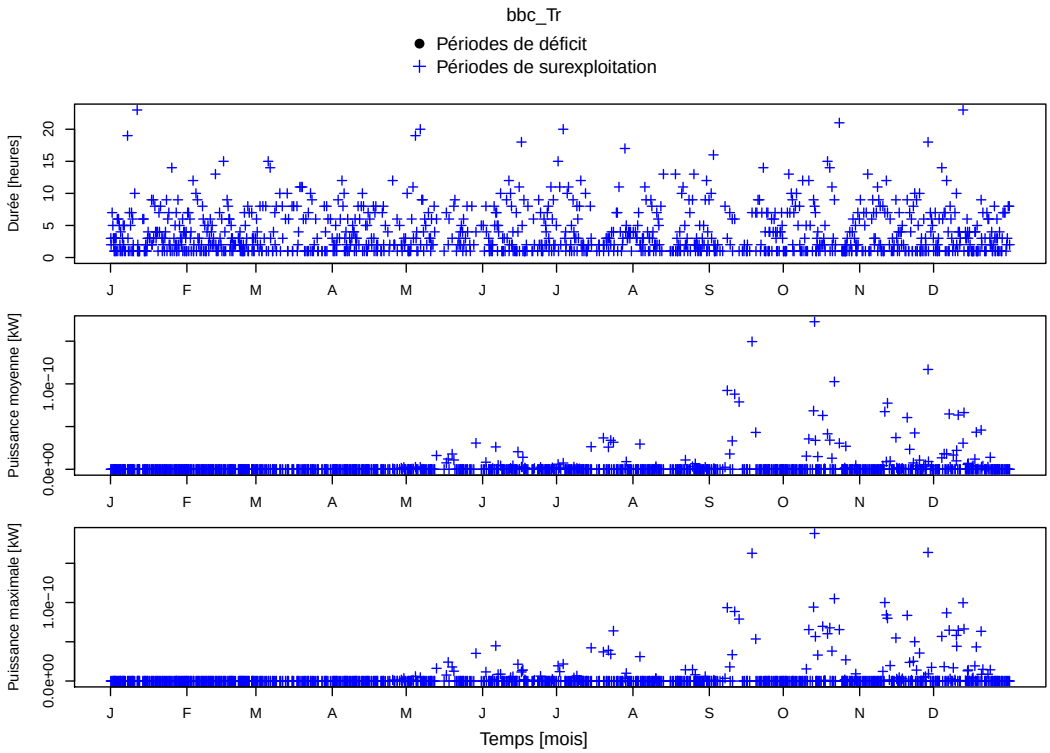

FIGURE 4.43 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel du ciel par la maison INCAS en version BBC à Trappes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

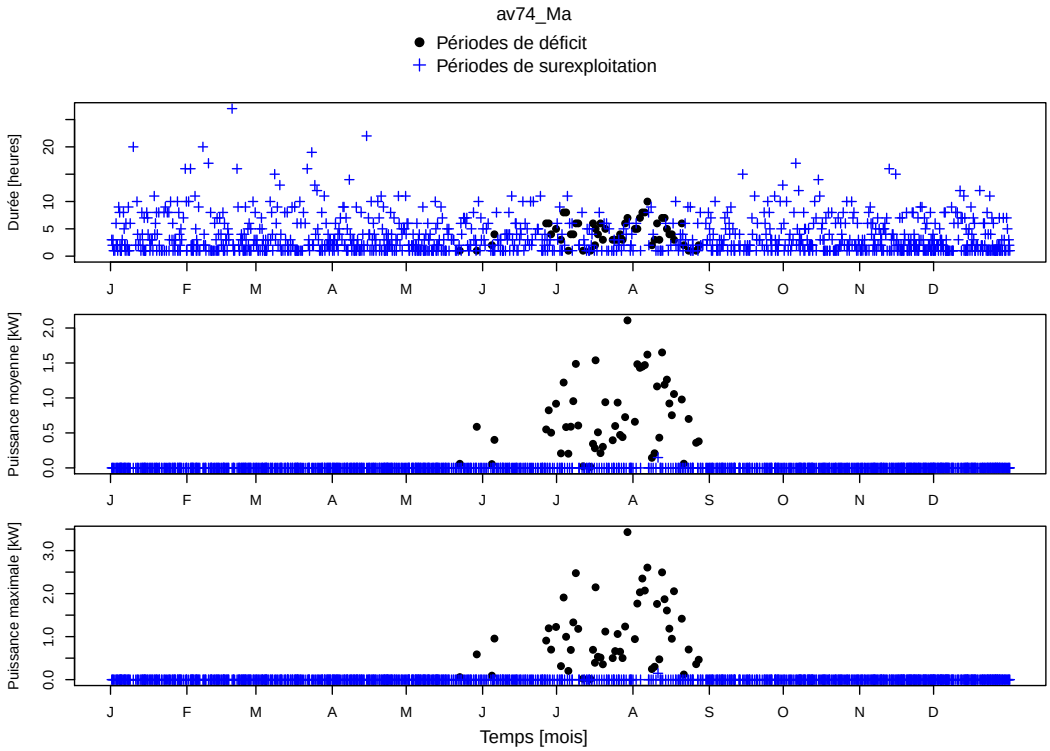

FIGURE 4.44 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel du ciel par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Marseille

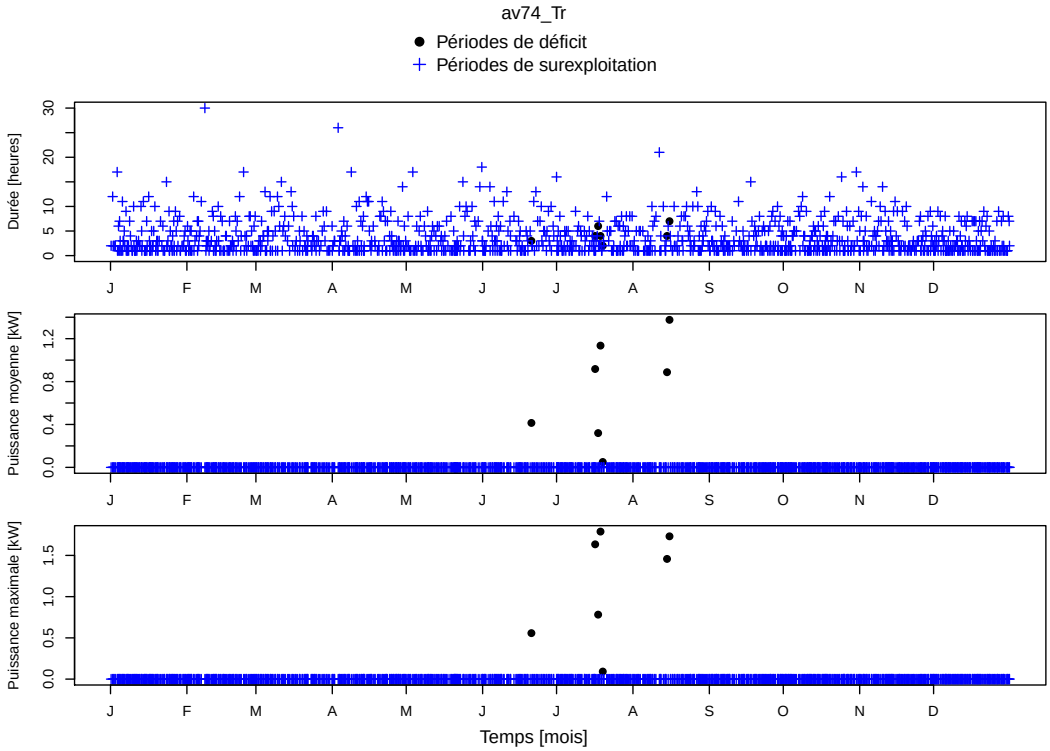

FIGURE 4.45 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel du ciel par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Trappes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

En revanche, lorsque l'on regarde la distribution des puissances moyennes et maximales, on constate que les puissances correspondant aux périodes de déficit sont toujours supérieures aux puissances correspondant aux périodes de surexploitation. Ce constat est particulièrement vrai pour les versions de bâtiment d'avant 1974 où les puissances sont conséquentes (de l'ordre du kW). Ces courbes montrent donc que si le ciel est une ressource permanente, dont la surexploitation peut couvrir de longues périodes, les puissances mises en jeu dans cette surexploitation sont assez faibles. L'amélioration des taux d'exploitation du ciel est donc une piste non négligeable dans l'amélioration du comportement thermique estival des bâtiments.

4.4.3.3 Air

Les figures 4.46, 4.47, 4.48 et 4.49 présentent la caractérisation des périodes de déficit (points noirs) et de surexploitation du potentiel de l'air (croix vertes) dans toutes les configurations de la maison INCAS. On analysera plus particulièrement les résultats ciblés durant la période de rafraîchissement identifiées dans les parties précédentes (mai à septembre). Pendant cette période on voit que les résultats dépendent beaucoup plus du climat concerné que de la version du bâtiment.

En effet, à Marseille (figures 4.46 et 4.47) les périodes de déficit de potentiel sont caractérisées par des durées assez longues (entre dix et vingt heures), qui ne peuvent, la plupart du temps, pas être compensées par des périodes de surexploitation d'une durée équivalente. De même, on voit que les puissances nécessaires en période de déficit sont bien supérieures aux puissances restituées en périodes de surexploitation, particulièrement dans le cas de la version d'avant 1974 à Marseille. En effet, dans ce cas particulier, les périodes de déficit correspondent à la combinaison d'un potentiel de l'air nul et d'un besoin de rafraîchissement maximal.

À Trappes (figures 4.48 et 4.49), on constate tout d'abord que le nombre de périodes où le potentiel de l'air est inférieur au besoin de rafraîchissement est beaucoup plus restreint (de l'ordre d'une vingtaine d'occurrences en BBC comme en version d'avant 1974). En outre, la durée de ces périodes n'excède pas douze heures dans les deux cas, ce qui leur permet d'être facilement compensées par des périodes de surexploitation de durée égale ou supérieure. En termes de puissances moyennes et maximales, les périodes de surexploitation ne permettent cependant pas toujours de compenser les périodes de déficit de potentiel de l'air, surtout en version d'avant 1974 où la différence entre les puissances mises en jeu est proche d'un facteur 5.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

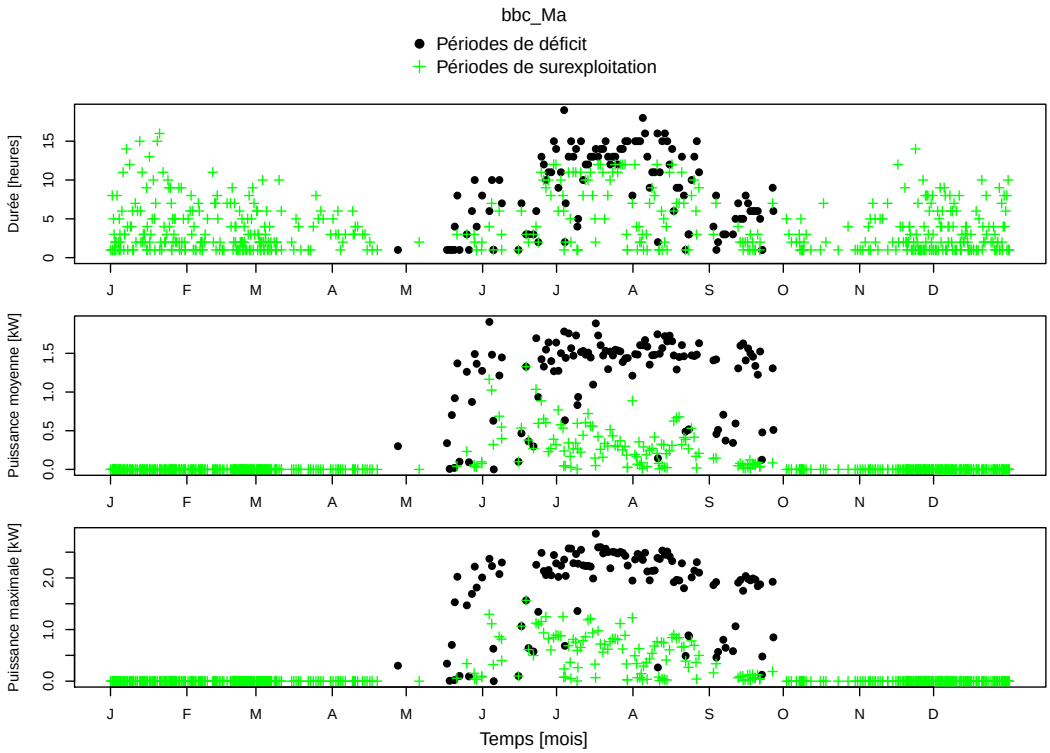

FIGURE 4.46 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel de l'air par la maison INCAS en version BBC à Marseille

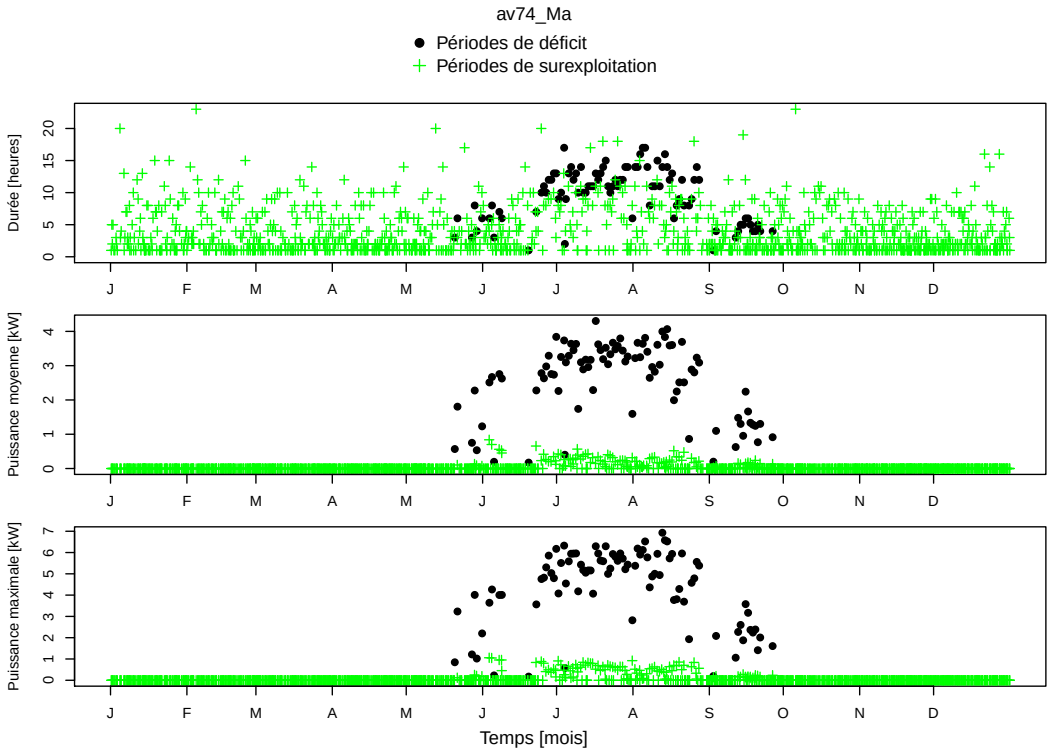

FIGURE 4.47 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel de l'air par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Marseille

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

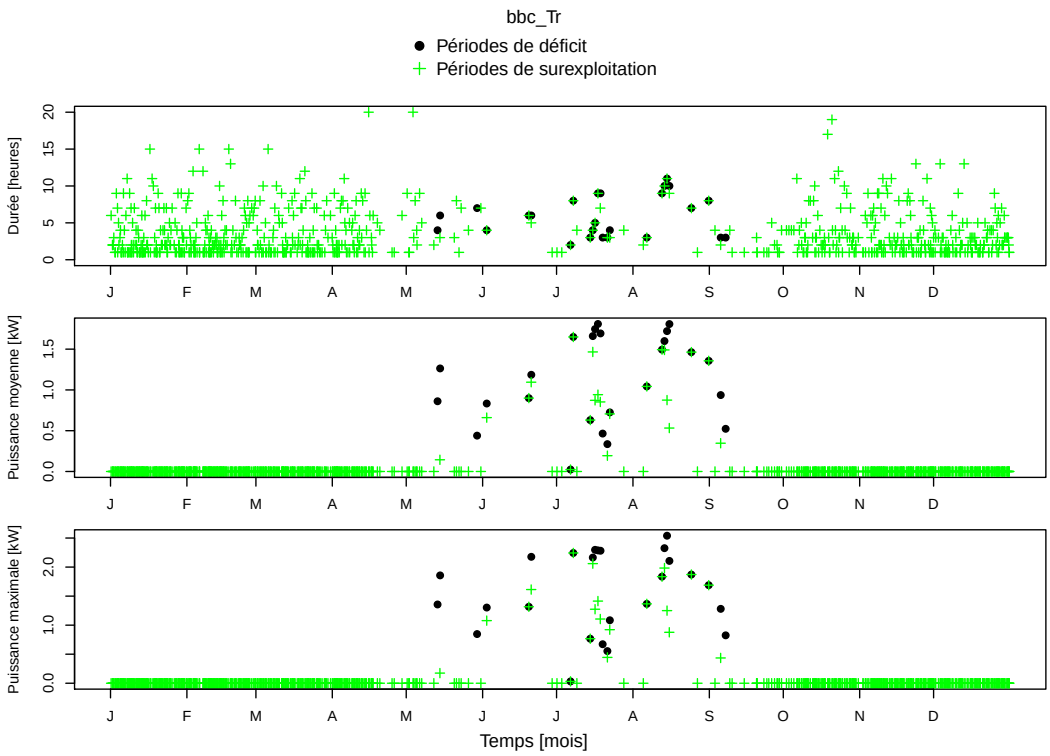

FIGURE 4.48 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel de l'air par la maison INCAS en version BBC à Trappes

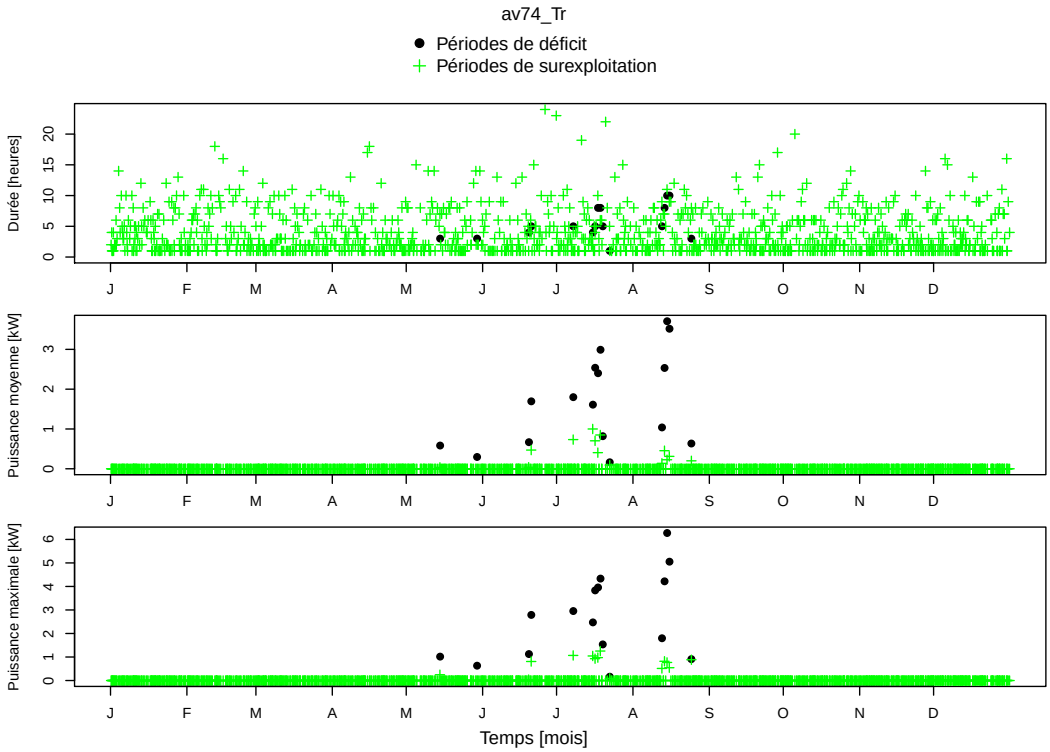

FIGURE 4.49 – Caractérisation des périodes de déficit et de surexploitation du potentiel de l'air par la maison INCAS en version d'avant 1974 à Trappes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4.4 Conclusions sur l'analyse dynamique

L'analyse dynamique des résultats a apporté un point de vue temporel sur les différents indicateurs, ce qui permet de compléter la vision globale des parties précédentes.

On a pu ainsi prendre conscience de l'utilité de la totalité du potentiel solaire en période de chauffage, et ce, quelle que soit la configuration. Or ce potentiel n'est que faiblement exploité par le bâtiment. On a vu que l'exploitation du soleil suivait un cycle de charge et de décharge, décalé d'environ deux heures par rapport au potentiel concomitant dans le cas des bâtiments d'avant 1974. Dans ces cas particuliers, la décharge est alors complète et ne permet pas de couvrir les périodes de manque de potentiel en hiver. D'une part le stock n'est pas assez important, et d'autre part il se vide trop rapidement à cause des pertes thermiques importantes. En version BBC, le problème est différent, le stock ne se vide jamais complètement mais l'exploitation du potentiel solaire est tout de même trop faible pour couvrir les besoins en période de chauffage. Ce résultat montre donc que des efforts sont à fournir pour convertir le potentiel solaire utile et disponible en grande quantité, en potentiel exploité.

Les résultats concernant le ciel sont caractéristiques de la permanence et de la faible exploitation de cette ressource. Les résultats montrent en effet que l'exploitation du ciel est seulement limitée dans le temps par la présence des besoins et les quelques périodes de manque de potentiel peuvent être comblées très facilement en durée par une surexploitation de la ressource. En revanche les puissances d'exploitation sont très faibles et ne suffisent donc pas à compenser ce déficit de potentiel.

Pour l'air, qui est une ressource intermittente, les résultats ont montré que le potentiel et les besoins n'étaient pas en phase : les besoins de rafraîchissement sont principalement présents en journée, tandis que le potentiel de rafraichissement est principalement présent durant la nuit. L'exploitation du potentiel de l'air par le bâtiment est donc décalée. Cependant cette exploitation n'est pas assez élevée pour constituer un stock permettant de combler les périodes de manque en durée comme en puissance, surtout en climat chaud.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Chapitre 5

Améliorer les performances bioclimatiques de l'enveloppe du bâtiment

Le chapitre précédent a montré que les bâtiments, tels qu'ils sont conçus actuellement, qu'ils soient bien isolés ou pas du tout, n'exploitent que très peu la ressource solaire. Seules les fenêtres, qui exploitent très bien le potentiel solaire (taux d'exploitation proche de 50%), se comportent comme de véritables composants bioclimatiques, à l'inverse des parois opaques qui utilisent très mal le soleil, bien qu'elles constituent la majorité de l'enveloppe.

L'isolation est apparue comme un élément discriminant dans l'exploitation des ressources : les bâtiments bien isolés parviennent à mieux couvrir leurs besoins de chauffage à l'aide du soleil que les bâtiments mal isolés, sans toutefois mieux exploiter cette ressource. À partir de ces observations, sur deux cas extrêmes, on peut se demander comment évoluent les différents indicateurs de potentiel et de performance bioclimatiques en fonction du niveau d'isolation. Un premier pas vers l'amélioration de la performance solaire des bâtiments consiste donc à réaliser une étude paramétrique des différents indicateurs en fonction de l'épaisseur d'isolation de l'enveloppe.

En outre, il peut être intéressant de tester nos indicateurs de performance sur des bâtiments munis de composants d'enveloppe réputés bioclimatiques. Les premiers chapitres ont montré que les systèmes d'enveloppe les plus avancés en termes d'exploitation des ressources de l'environnement étaient les technologies solaires. Dans le cadre du projet ANR-HABISOL VALERIE, plusieurs systèmes d'enveloppe exploitant le gisement solaire ont donc été intégrés aux bâtiments classiques. Les simulations de ces nouvelles configurations ont permis de calculer à nouveau les indicateurs de potentiel et d'exploitation qui ont été confrontés aux indicateurs calculés pour les bâtiments d'origine.

Enfin, une autre application intéressante de ces indicateurs serait de les employer comme critères d'optimisation. En effet, on a vu que les principes bioclimatiques apparaissent souvent comme des moyens pour diminuer les consommations résiduelles du bâtiment (grandes surfaces vitrées au sud, triples-vitrages et isolation au nord...). C'est évidemment le but ultime, mais le seul critère de minimisation des besoins résiduels tend naturellement à favoriser l'isolation qui, au-delà d'un niveau finalement pas si élevé, montre ses limites : l'impact de l'isolation sur la consommation ne cesse de se réduire. Pour gagner encore en performance, il faut alors envisager d'autres moyens. Les technologies bioclimatiques offre une voie complémentaire et on peut imaginer intégrer dans le processus de conception, outre le critère classique de minimisation des besoins, un critère de maximisation de l'exploitation des ressources.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.1 Influence du niveau d'isolation sur les performances bioclimatiques des bâtiments

Dans le chapitre précédent nous avons pu constater que l'isolation, en réduisant les besoins de chauffage des bâtiments, permettait également d'augmenter leur marge bioclimatique par rapport au potentiel du soleil. En effet, la différence entre la quantité de rayonnement solaire utile et les besoins de chauffage réels d'un bâtiment bien isolé est plus importante que celle d'un bâtiment mal isolé. Cependant, on a vu que ce potentiel solaire était moins bien utilisé par les bâtiments bien isolés que par les bâtiments mal isolés. Paradoxalement, il semble donc que l'isolation, tout en augmentant la marge de potentiel solaire utile d'un bâtiment, freine son exploitation. Les deux cas que nous avons étudiés dans cette thèse sont néanmoins extrêmes : un bâtiment sans isolation et un bâtiment dont les murs sont isolés avec $20\,\mathrm{cm}$ de laine de verre. Il semble donc pertinent de se demander si la variation des différents indicateurs est proportionnelle au niveau d'isolation ou si elle se tasse à partir d'une certaine épaisseur d'isolant, comme pour les besoins résiduels.

5.1.1 Influence de l'isolation sur la marge bioclimatique

5.1.1.1 Influence annuelle

Le chapitre 4 a montré qu'un bâtiment bien isolé avait plus de marge de potentiel solaire qu'un bâtiment mal isolé. Pour évaluer les effets du niveau d'isolation sur cette marge bioclimatique on réalise une analyse paramétrique en modélisant le bâtiment en version d'avant 1974 qu'on isole progressivement, centimètre par centimètre, jusqu'à atteindre le niveau d'isolation de la maison BBC, c'est à dire $20\,\mathrm{cm}$. Pour observer uniquement les effets de l'isolation, et ce dans le cas le plus défavorable, la récupération de chaleur sur air extrait (ventilation double-flux) n'est pas modélisée et on se place dans le climat de Trappes.

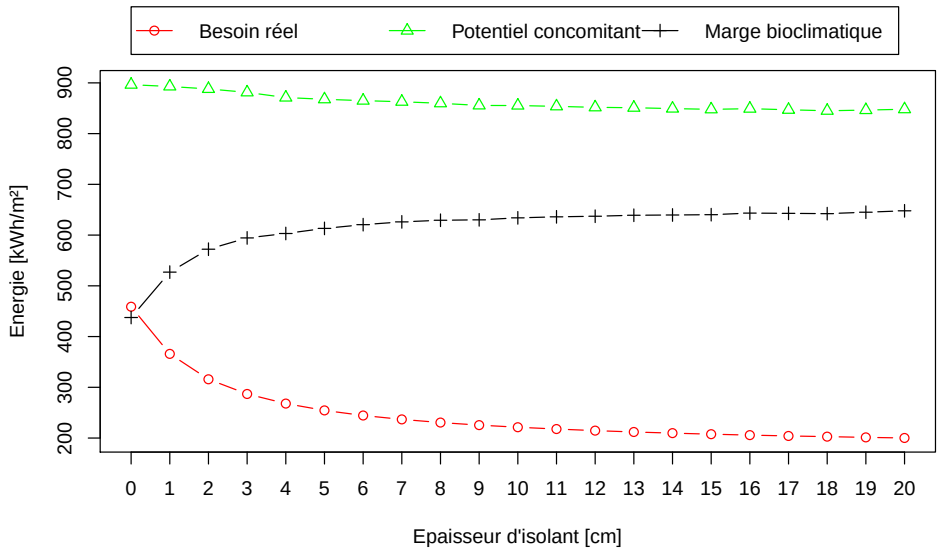

FIGURE 5.1 – Besoins de chauffage réels, potentiel solaire concomitant et marge bioclimatique annuels de la maison INCAS à Trappes en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité $\lambda = 0.035\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La figure 5.1 montre l'évolution des besoins de chauffage réels, du potentiel solaire concomitant ainsi que de la différence entre potentiel et besoin, la marge bioclimatique, de la maison INCAS en fonction du niveau d'isolation. On voit sur cette figure que les besoin réels (sans soleil) ont le même comportement que les besoins résiduels, c'est-à-dire qu'ils diminuent fortement avec les premiers centimètres d'isolation, mais que l'effet de chaque centimètre ajouté est de moins en moins perceptible à mesure que l'épaisseur augmente. On remarque également sur cette figure que l'effet du niveau d'isolation sur le potentiel solaire concomitant est très marginal. Le résultat le plus remarquable est l'impact de l'isolation sur la marge bioclimatique entre potentiel solaire et besoin de chauffage réel. On constate en effet que l'évolution de cette marge est semblable à celle des besoins, c'est à dire qu'elle croît rapidement avec les premiers centimètres d'isolation, mais cette augmentation se tasse à partir de quelques centimètres. La courbe représentant la marge bioclimatique semble ainsi tendre vers une asymptote tout comme celle des besoins résiduels, et on voit qu'à partir de $6\,\mathrm{cm}$ d'isolant, dans ce cas particulier, l'amélioration de la marge bioclimatique est peu significative.

5.1.1.2 Influence sur les mois d'hiver

Dans le chapitre précédent, on a pu constater qu'un excès annuel de potentiel concomitant par rapport aux besoins réels (une marge bioclimatique positive) pouvait dissimuler des disparités sur l'année. En effet, dans le cas de la maison non isolée à Trappes, la marge bioclimatique mensuelle était négative en hiver : le potentiel solaire concomitant était moins élevé que les besoins de chauffage réels entre novembre et février. Comme cette marge est positive pour la maison BBC à Trappes, il peut être intéressant de déterminer, à partir de quel niveau d'isolation elle le devient.

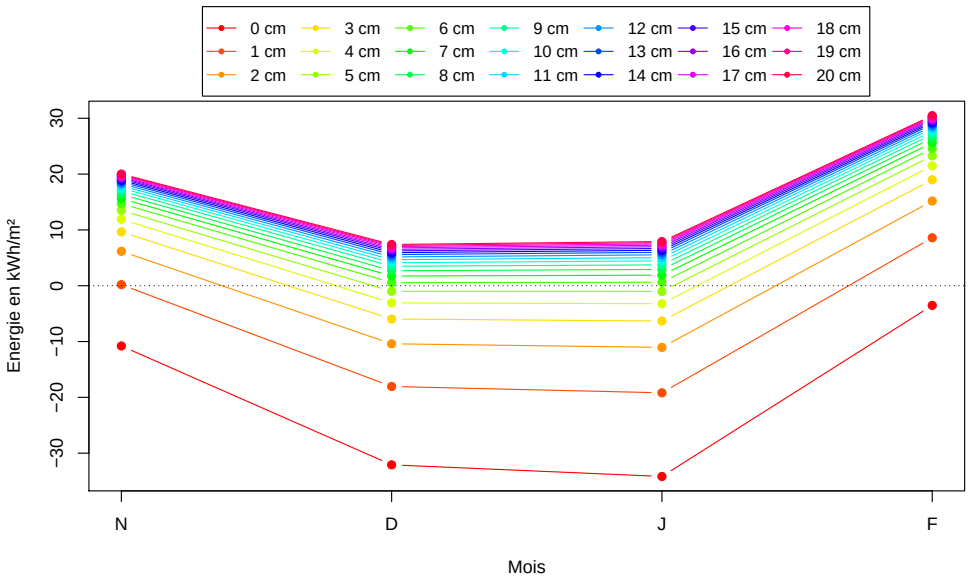

FIGURE 5.2 – Différence entre potentiel solaire concomitant et besoins de chauffage réels de la maison INCAS à Trappes en hiver en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité $\lambda = 0.035\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$)

La figure 5.2 présente, pour les mois de novembre à janvier, l'influence de l'épaisseur d'isolant sur la différence entre le potentiel concomitant du soleil et les besoins réels de chauffage de la maison INCAS à Trappes. Cette différence est négative sur les quatre mois pour un bâtiment non isolé et augmente avec le niveau d'isolation. On voit que cette augmentation est assez forte pour les premiers centimètres d'isolant,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

et se tasse progressivement comme pour les résultats annuels. Ajouter 1 cm de laine de verre permet ainsi de rendre la marge de potentiel positive en novembre et en février et il faut 6 cm d'isolant pour que cette marge soit positive sur tous les mois d'hiver. On constate d'ailleurs qu'à partir de 6 cm son augmentation est très réduite, et qu'à partir de 10 cm elle est quasiment nulle. On retrouve ainsi les mêmes valeurs critiques qu'à l'échelle annuelle.

5.1.2 Influence de l'isolation sur l'exploitation du potentiel solaire

On a vu que l'isolation permettait d'augmenter la part du potentiel solaire disponible pour couvrir les besoins de chauffage. L'analyse globale a cependant montré que ce potentiel était relativement mal exploité avec des taux d'exploitation ne dépassant pas les 15%. La figure 5.3 montre l'influence de l'isolation sur le potentiel exploité du soleil, sur les besoins (réels et résiduels) de chauffage ainsi que sur le potentiel solaire concomitant non exploité.

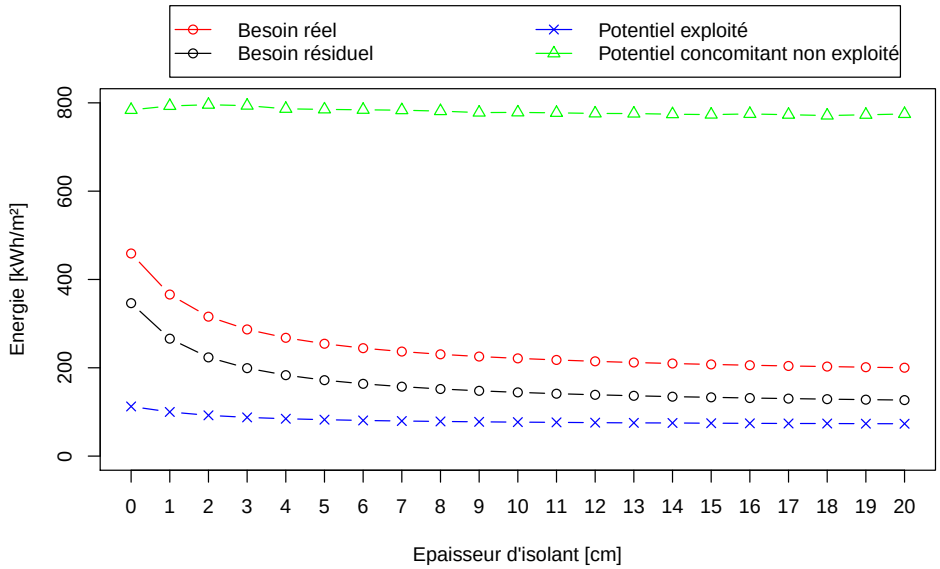

FIGURE 5.3 – Besoins réels et résiduels, potentiel exploité du soleil, et potentiel solaire non exploité par la maison INCAS à Trappes en hiver en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité $\lambda = 0.035\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$)

On voit sur la figure 5.3, que le niveau d'isolation a une influence relativement faible sur le potentiel exploité (courbe bleue) par comparaison à la réduction des besoins réels (en rouge) et résiduels (en noir) qu'elle permet. Ainsi, la part utile et non exploitée du potentiel solaire concomitant (courbe verte) reste très supérieure aux besoins.

La figure 5.4 présente l'évolution des taux de couverture des besoins et d'exploitation du potentiel solaire par la maison INCAS, en fonction du niveau d'isolation. On peut voir sur cette figure que le taux d'exploitation n'est que peu affecté par le niveau d'isolation alors que le taux de couverture des besoins augmente avec l'épaisseur d'isolation. En effet, alors que le potentiel exploité reste constant, le besoin réel diminue et il est donc mieux couvert en proportion.

Ces figures nous permettent de visualiser la complémentarité entre l'approche bioclimatique et l'isolation. En effet, l'isolation ne change pas l'exploitation et laisse intacte la réserve de potentiel bioclimatique. Mais elle rend l'impact de cette exploitation sur le besoin résiduel plus visible et plus efficace.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

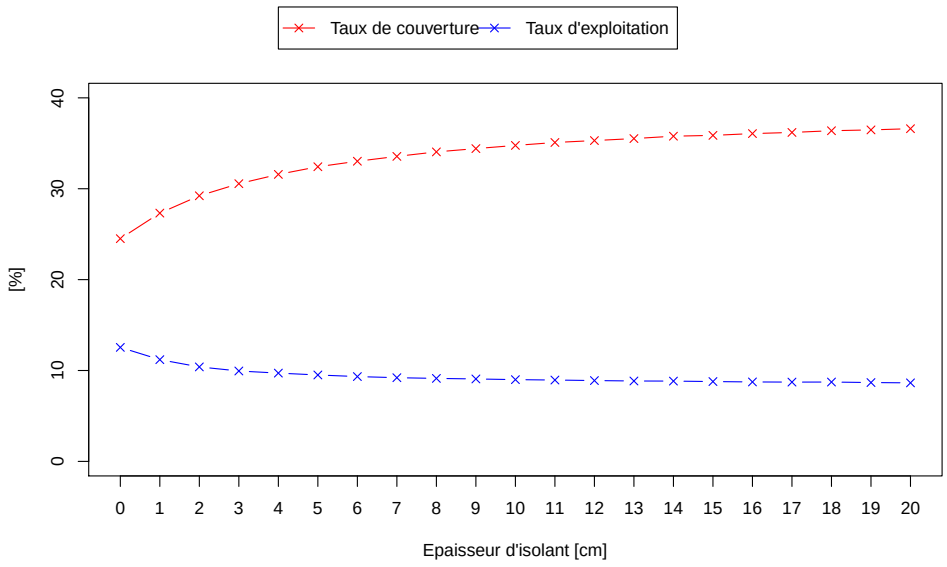

FIGURE 5.4 – Taux de couverture des besoins de chauffage et taux d'exploitation du soleil par la maison INCAS à Trappes en hiver en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité $\lambda = 0.035\,\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$)

5.1.3 Conclusions sur l'influence de l'isolation

En isolant les bâtiments on diminue les pertes thermiques vers l'extérieur et donc les besoins de chauffage des bâtiments. Avec cette solution on parvient donc à atteindre les niveaux de performance requis par les réglementations thermiques et les labels actuels (BBC par exemple). Mais les exigences en matière de performance énergétique des bâtiments sont de plus en plus contraignantes car, à terme, on vise la conception de bâtiments « zéro énergie » voire à énergie positive (BEPOS) qui seront capables de produire plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Cette partie a montré que la réduction des besoins des bâtiments actuels, très bien isolés, semblait avoir atteint un plafond. Cette limite semble également être atteinte en termes de marge bioclimatique. Pour aller plus loin, et réellement utiliser ce potentiel solaire disponible en grande quantité, il semble nécessaire d'adopter un nouveau point de vue basé sur l'amélioration des performances bioclimatiques des bâtiments.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2 Évaluation de solutions d'enveloppe solaire

Dans le cadre du projet ANR-HABISOL VALERIE ([Duforestel *et al.*, 2012]) plusieurs types de bâtiments ont été modélisés et simulés dans des climats différents. À partir de ces simulations, les indicateurs de performance ont pu être calculés et les conclusions sont similaires à celles obtenues uniquement pour les maisons individuelles. On a notamment conclu que les parois opaques exploitaient très peu le rayonnement solaire, qu'elles soient isolées ou non. Or il existe des technologies réputées « solaires » qui visent à améliorer l'exploitation du soleil par les parois. Ces technologies ont été implémentées sur différents bâtiments afin de tester leurs réelles performances bioclimatiques au regard des critères décrits dans cette thèse. Cet exercice va également nous permettre de mieux apprécier la pertinence de nos indicateurs, notamment au regard d'une évaluation uniquement basée sur le gain énergétique.

5.2.1 Présentation des bâtiments et des solutions d'enveloppe

Trois types de bâtiments différents ont été modélisés dans le cadre du projet ANR-HABISOL VALERIE, sur des logiciels différents. Seules la maison INCAS a été modélisée deux fois dans deux environnement différents, ce qui a permis un calage précis des simulations. Cinq technologies de parois opaques solaires ont été testées, et intégrées pour la plupart à un seul bâtiment. L'une d'entre elles a cependant été évaluée sur deux bâtiments différents. Afin de bien saisir le cadre de l'étude, les bâtiments et les technologies sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

5.2.1.1 Bâtiments

Dans le projet ANR-HABISOL VALERIE, trois types de bâtiments ont été modélisés :
- une maison individuelle (MI), en fait la maison INCAS déjà décrite au chapitre précédent,
- un bâtiment tertiaire (TER),
- un bâtiment de logements collectifs (HLM).

FIGURE 5.5 – Les trois bâtiments modélisés dans le projet VALERIE : maison individuelle INCAS, bâtiment tertiaire du site des Renardières, et immeuble HLM à Montreuil

La maison individuelle est la maison INCAS. Elle a été modélisée à EDF R&D sous CLIM2000 et au LOCIE à l'aide de l'environnement SPARK.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Le bâtiment tertiaire modélisé est l'un des bâtiments de bureaux du site de recherche des Renardières d'EDF R&D à Moret-sur-Loing (Seine-et-Marne). C'est un bâtiment de $1300\,\mathrm{m}^2$ construit sur deux niveaux et fortement vitré, la surface totale des fenêtres représentant 1/5 de la surface totale des parois verticales. Il a été modélisé à EDF R&D sous CLIM2000.

Le bâtiment de logement collectif est un immeuble HLM de quatre étages, composé de deux ailes perpendiculaires et représentant une surface totale habitable de $4588\,\mathrm{m}^2$. Il est modélisé sous PLEIADES-COMFIE à Armines.

Ces trois bâtiments sont modélisés dans deux versions : une version non isolée d'avant 1974 (notée « av74 » dans les tableaux) et une version bien isolée, avec ventilation double-flux (notée « bbc » dans les tableaux). Trois types de météos ont été testés dans le projet : la météo de Marseille notée « Ma », celle de Chambéry notée « Ch », et la météo de Trappes notée « Tr ».

Une description détaillée de ces bâtiments et des résultats des simulations peut être trouvée dans le rapport final du projet VALERIE ([Duforestel *et al.*, 2012]). On rappelle cependant ici (tableau 5.1) les valeurs des indicateurs obtenues pour le soleil. Pour plus de clarté, les valeurs sont arrondies à la dizaine de $\mathrm{kWh/m^2habitable}$ pour les indicateurs absolus, et au dixième près pour les valeurs relatives (taux d'exploitation, de couverture, et de génération des besoins).

source	bati	version	meteo	potentiel concomitant	besoins sans source	potentiel exploite	besoins generes	besoins avec source	taux couverture	taux exploitation	taux generation
soleil	HLM	av74	Ma	800	280	100	30	180	30%	10%	100%
			Ch	920	460	110	10	350	20%	10%	100%
		bbc	Ma	630	20	20	30	0	100%	0%	100%
			Ch	710	60	40	10	10	80%	10%	100%
	MI	av74	Ma	190	150	50	30	100	40%	30%	90%
			Tr	250	260	70	0	190	30%	30%	100%
		bbc	Ma	160	60	30	20	40	40%	20%	80%
			Tr	210	110	30	0	80	20%	10%	100%
	TER	av74	Ma	250	50	10	10	40	20%	0%	70%
			Tr	300	100	20	0	80	20%	10%	100%
		bbc	Ma	140	10	10	30	0	80%	0%	80%
			Tr	190	20	10	20	10	50%	10%	100%

TABLE 5.1 – Indicateurs de potentiel et de performance des différents bâtiments pour le soleil (valeurs absolues en $\mathrm{kWh/m^2habitable}$)

Les résultats des simulations sur les bâtiments types ont montré que le soleil était peu exploité (taux d'exploitation < 15%) notamment par les bâtiments d'avant 1974 qui avaient des besoins de chauffage encore très élevés à couvrir. Cependant, les bâtiments testés jusqu'à présent n'avaient aucune prétention en matière d'exploitation du potentiel solaire. Ainsi, afin de connaître les avantages et les limites de solutions solaires connues, des simulations ont été menées sur la base des bâtiments d'avant 1974 améliorés à l'aide de technologies d'enveloppe dites avancées. Les bâtiments BBC n'ont pas été testés dans ce contexte, puisqu'étant déjà très isolés, ils ne sont pas propices à l'ajout de technologies solaires d'enveloppe. Il est important de noter que ces technologies n'ont pas été optimisées (à part l'installation solaire), notamment dans leur fonctionnement estival.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2.1.2 Solutions avancées

Les cinq technologies solaires qui ont été testées dans le cadre du projet VALERIE sont présentées en détail dans le rapport final du projet ([Duforestel *et al.*, 2012]) :

- un mur Trombe non ventilé ou mur capteur (MT),
- un mur Trombe ventilé (MTv),
- un mur pariéto-dynamique bi-lame (MP),
- une isolation transparente de $25\,\mathrm{cm}$ d'épaisseur (TIM25),
- une « installation solaire » combinant panneau solaire thermique, ballons de stockage et plancher chauffant (IS).

Les quatre premières technologies sont réellement des solutions d'enveloppe, c'est à dire qu'elles s'intègrent aux parois opaques des bâtiments existants. La plupart du temps, il s'agit surtout de surimposer un nouvel élément à la paroi pré-existante. Dans le cas des deux murs Trombe, on modélise en fait l'ajout d'une paroi vitrée en avant du mur non isolée. De même, l'isolation transparente vient se juxtaposer à la paroi existante. Enfin, le mur pariéto-dynamique est accolé à la surface extérieure du mur existant.

Seule la dernière technologie, l'installation solaire, n'est pas réellement une solution d'enveloppe. Cette dernière technologie fonctionne selon plusieurs modes contrôlés visant à utiliser la ressource solaire quand elle est disponible et la stocker en prévision des nuits et des jours peu ensoleillés. On est donc en présence, non seulement d'un début de stratégie d'optimisation, mais également d'une stratégie de stockage court-terme.

On notera que mis à part cette dernière solution, les quatre premières n'ont pas du tout été optimisées. Par exemple, le mur Trombe ventilé et le mur pariéto-dynamique, qui fournissent l'air de ventilation, ne sont pas munis de clapets et l'air qui sort de la paroi n'est ainsi pas toujours réchauffé (notamment la nuit). D'autre part les technologies ont été implémentées sur toutes les façades, quelle que soit leur orientation, ce qui peut provoquer des configurations inappropriées, notamment pour certaines solutions au nord. Enfin, à part la façade sud de la maison individuelle qui est munie de casquettes, les technologies solaires n'ont pas été protégées des apports solaires néfastes estivaux. Les indicateurs devront donc montrer ces effets.

Le tableau 5.2.1.2 liste les cinq technologies et les bâtiments sur lesquels elles ont été implémentées.

Désignation	Description	Implémentation
MT	Mur Trombe non ventilé (mur capteur)	MI
MTv	Mur Trombe ventilé	HLM
MP	Mur pariéto-dynamique bi-lames	TER
TIM25	Isolation transparente d'épaisseur 25cm	TER
IS	Installation solaire (capteur thermique + ballon + plancher chauffant + régulation)	MI

TABLE 5.2 – Liste des technologies solaires avancées testées

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2.1.2.1 Mur Trombe non ventilé (MT)

Le mur Trombe non ventilé est composé d'une simple paroi vitrée placée devant le mur à équiper. La lame d'air ainsi créée n'est pas ventilée mais se réchauffe sous l'effet du rayonnement solaire piégé par effet de serre. La paroi opaque a un taux d'absorption du rayonnement solaire maximal : ainsi les multiples réflexions en courtes longueurs d'onde ne sont pas prises en compte dans le modèle. En revanche, les échanges radiatifs par émissions et réflexions en grandes longueurs d'ondes sont pris en compte entre la paroi vitrée et la paroi opaque. Les températures de surface des parois vitrées et opaques sont considérées comme homogènes sur toute la surface.

Les paramètres utilisés pour les simulations sont :
- une épaisseur de lame d'air égale à $10\,\mathrm{cm}$,
- un coefficient convectif à l'intérieur de la lame d'air égal à $10\,\mathrm{W/(m^2{\cdot}K)}$,

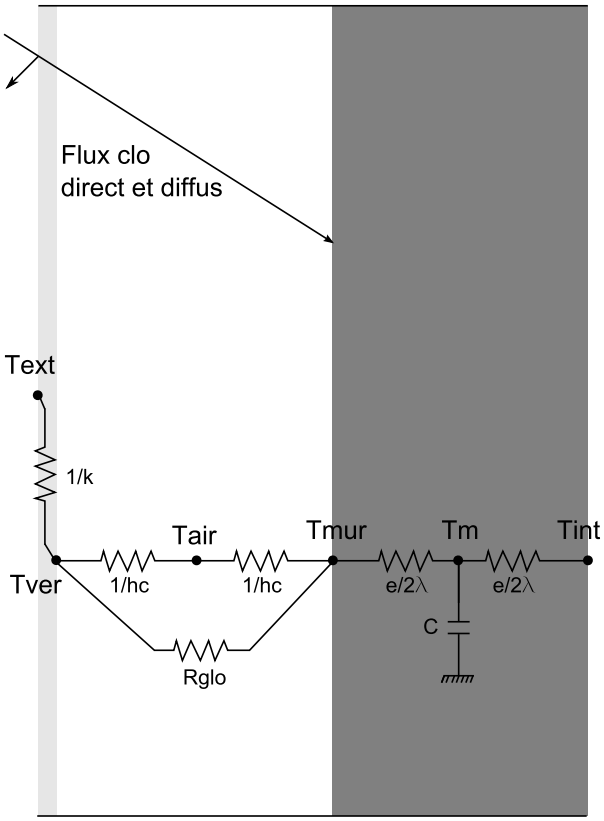

FIGURE 5.6 – Schéma de modélisation du mur Trombe non ventilé

5.2.1.2.2 Mur Trombe ventilé (MTv)

Le mur Trombe ventilé a été modélisé et intégré à l'immeuble HLM dans PLEIADES-COMFIE à Armines par Stéphane Thiers. La différence avec la façade présentée ci-avant est que la lame d'air placée entre la façade vitrée et la façade opaque est mise en contact avec l'intérieur du bâtiment via des évents placés près du plafond et du plancher dans chaque volume vitré. La surface totale de ces évents est égale à 3% de la surface des façades et la distance séparant deux évents est de $2.5\,\mathrm{m}$.

Une circulation d'air naturelle s'instaure entre ces ouvertures. Elle n'est pas régulée (pas de clapet anti-retour), ce qui signifie que les échanges peuvent intervenir dans les deux sens. Ce choix rend a priori

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

la solution du mur Trombe moins performante que la façade double-peau classique ventilée mécaniquement. Ce résultat dépend toutefois des caractéristiques radiatives du vitrage extérieur. Un simple vitrage a été considéré dans cette étude.

L'usage d'un clapet anti-retour, dans un sens comme dans l'autre, tend à améliorer la performance en hiver et à la dégrader en été (ou inversement selon le sens du clapet anti-retour) et il n'a pas paru opportun de retenir l'une ou l'autre de ces solutions. En pratique, une ouverture vers l'extérieur est parfois ménagée dans la partie supérieure du vitrage, de manière à constituer une sur-ventilation naturelle en été, permettant de rafraîchir le volume entre vitrage et mur support.

L'épaisseur de la lame d'air considérée est de $20\,\mathrm{cm}$ (une épaisseur de 5 à $10\,\mathrm{cm}$ est plus courante). Afin de favoriser le captage du rayonnement solaire par la paroi de la façade, l'état de surface retenu sur la façade est très absorbant (peinture sombre, absorptivité égale à 0,85).

5.2.1.2.3 Mur pariéto-dynamique bi-lame (MP)

Le mur pariéto-dynamique (ou hélio-pariéto-dynamique) a été développé sous CLIM2000 à EDF R&D par Cédric Bonnet et Hassan Bouia et intégré à l'enveloppe du batiment tertiaire par Denis Covalet. Il s'agit d'une paroi opaque qui intègre en son sein un canal d'air en forme de « U » dans lequel l'air neuf aspiré par le système de ventilation va circuler avant de pénétrer dans le bâtiment. Dans le principe, le fonctionnement d'une telle paroi consiste à capter les apports solaires qui frappent la peau extérieure du composant (effet « hélio-dynamique ») et à capter également une partie du flux de déperdition de la paroi pour la restituer à l'air entrant (effet « pariéto-dynamique ») quitte pour cela à augmenter un peu cette déperdition.

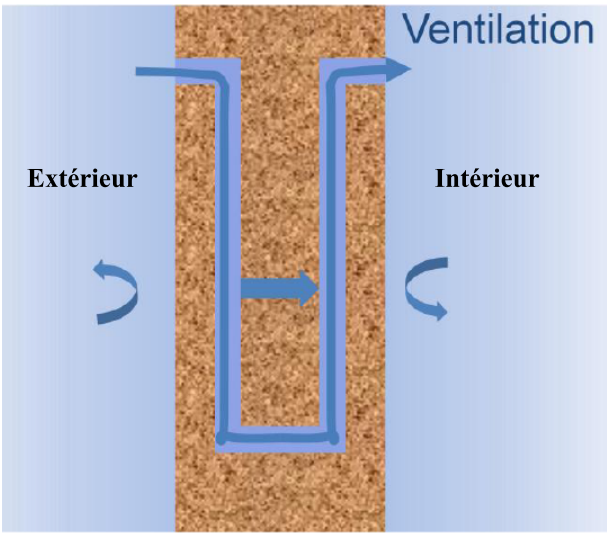

FIGURE 5.7 – Schéma de principe du mur hélio-pariéto dynamique

Destiné à apporter des gains d'énergie durant la saison d'hiver, le système, pour être efficace, doit présenter des gains sur la ventilation supérieurs à l'augmentation des pertes en paroi. Le système a été testé sur le bâtiment tertiaire non isolé dont il couvre toutes les parties opaques de l'enveloppe d'origine. Les débits de ventilation adoptés sont les débits sanitaires classiques pour ce type de bâtiment.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2.1.2.4 Isolation transparente (TIM25)

Les panneaux d'isolation transparente ont été modélisés et intégrés au bâtiment tertiaire sous CLIM2000 à EDF R&D par Denis Covalet. Le but de l'isolation transparente est double : il s'agit à la fois de minimiser les pertes thermiques et de maximiser l'effet de serre, en recherchant une bonne transmission du rayonnement solaire. En pratique, il s'agit toujours d'un compromis à trouver, mais les progrès faits dans les procédés de fabrication depuis une vingtaine d'années ont permis d'améliorer les performances. Ces matériaux se caractérisent en particulier par :

- leur coefficient de transmission solaire τ,
- leur coefficient de déperdition thermique U en $\mathrm{W/(m^2{\cdot}K)}$.

FIGURE 5.8 – Composant Nanogel (à gauche) et illustration sur une toiture en polycarbonate (à droite)

Le matériau retenu pour l'étude est un aérogel de silice translucide intégré dans un panneau de polycarbonate. L'aérogel, de nom commercial Nanogel (société CABOT Aerogel), présente des propriétés (τ, U) qui dépendent de son épaisseur. On a choisi un composant de $25\,\mathrm{cm}$ d'épaisseur qui présente un taux de transmission du rayonnement solaire $\tau = 0.55$ et un coefficient de déperdition thermique $U = 0.34\,\mathrm{W/(m^2{\cdot}K)}$.

5.2.1.2.5 Installation solaire (IS)

L'installation solaire a été modélisée et intégrée à la maison INCAS sous SIM-SPARK par Layal Chahwane au LOCIE. Cette solution avancée permet de mettre en avant la capacité du bâtiment à capter des apports solaires disponibles à un certain moment de la journée (voire excédentaires) et de les stocker afin de les exploiter plus tard lorsque le besoin se présente.

Le système solaire combiné est constitué de capteurs solaires thermiques, un ballon solaire et un ballon de déstockage (respectivement à « Haute » et à « Basse Température ») et des planchers chauffants situés au RDC et à l'étage contribuant à chauffer l'air intérieur du bâtiment. D'une part, les capteurs solaires en toiture permettent de chauffer l'eau qui circule dans le système afin de charger les ballons de stockage et d'autre part cette énergie est stockée dans l'inertie du bâtiment par l'intermédiaire de planchers chauffants. Les planchers sont en général directement alimentés par les ballons mais si la température de l'eau à la sortie des capteurs n'est pas suffisamment élevée, celle-ci sera envoyée directement dans les dalles sans passer par les ballons de stockage. L'inertie des dalles permet alors de conserver la chaleur et de la restituer lorsque le bâtiment en a besoin. Le ballon de déstockage alimente les planchers chauffants à une température ne dépassant pas 40°C tandis que le ballon solaire a une fonction de stockage sur de longues périodes. C'est pourquoi son volume est supérieur à celui du ballon de déstockage. On a choisi dans notre cas un volume de 400 litres pour le ballon de déstockage et de 600 litres pour le ballon solaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

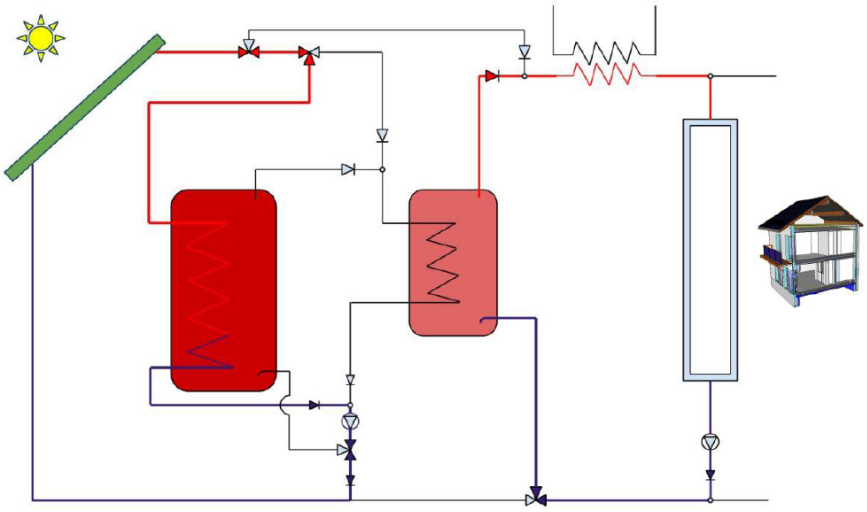

FIGURE 5.9 – Schéma de fonctionnement de l'installation solaire (en mode 2)

La logique de fonctionnement est établie selon huit modes qui dépendent des conditions extérieures et des besoins. Ces modes de fonctionnement sont décrits en détails dans la thèse de Layal Chahwane ([Chahwane, 2011]) sont résumés ci-après.

1. L'eau chaude en sortie des capteurs est envoyée directement vers le plancher (faible ensoleillement).
2. L'eau chaude en sortie des capteurs est à la fois stockée dans le ballon solaire et le chauffage du plancher est assurée par le ballon de déstockage (fort ensoleillement).
3. L'eau chaude en sortie des capteurs est simplement stockée dans le ballon solaire (fort ensoleillement et besoins nuls).
4. L'eau chaude en sortie des capteurs contribue à la fois à charger le ballon de déstockage et à stocker l'énergie dans le plancher solaire (faible ensoleillement).
5. L'eau chaude en sortie des capteurs est simplement stockée dans le ballon de déstockage (faible ensoleillement et besoins nuls).
6. Les capteurs son isolés et sont remplacés par le ballon solaire qui alimente le plancher par le biais du ballon de déstockage (ensoleillement nul).
7. Les capteurs sont isolés et le plancher n'est plus alimenté. Les deux ballons continuent à échanger afin de garder une température homogène (ensoleillement nul et besoin nul).
8. Arrêt du système.

5.2.2 Choix des indicateurs à utiliser dans l'analyse

Les indicateurs absolus (potentiel exploité, potentiel concomitant, besoin généré) ne pourront pas être utilisé tels quels pour la comparaison des différentes technologies entre elles, et pour la comparaison avec les bâtiments d'origine. En effet, étant donné que les caractéristiques thermiques de ces bâtiments vont changer avec l'ajout d'une technologie d'enveloppe, leur comportement va également être modifié, y compris dans les simulations sans soleil. Il ne sera par exemple pas pertinent de comparer le potentiel exploité avec et sans technologie, puisque les besoins réels, et donc le potentiel concomitant, auront également varié. Il faut donc se tenir à des indicateurs réellement comparables avant et après, et qui,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

par leur contenu, révèlent le comportement bioclimatique des solutions testées. Seuls les indicateurs de performance relative (taux d'exploitation, taux de couverture et taux de génération) pourront être comparés tels quels. Pour les autres critères, on pourra par exemple suivre l'évolution des grandeurs suivantes :

- les besoins de chauffage (critère d'efficacité classique),
- le potentiel inexploité (différence entre le potentiel concomitant et le potentiel exploité),
- l'impact global du soleil sur le bâtiment au travers de la différence entre le potentiel exploité (l'énergie économisée) et les besoins générés.

Si la technologie est performante, la première et la dernière grandeur doivent augmenter alors que la deuxième doit décroître.

Il sera également intéressant de comparer la variation du taux d'exploitation à la variation qu'il faudrait pour atteindre une valeur « idéale » qui permettrait d'obtenir un taux de couverture des besoins égal à 100%.

5.2.3 Résultats de l'analyse

Les résultats sont présentés sous forme de variation de la valeur des indicateurs par rapport à ceux calculés pour les bâtiments d'origine, sans technologie avancée. Les comportements particulièrement positifs sont repérés en vert, et ceux particulièrement négatifs, en rouge.

5.2.3.1 Variation des indicateurs absolus

Techno	Bâti	Météo	Besoins de chauffage		Potentiel inexploité		Impact global	
			Valeur initiale	Variation relative	Valeur initiale	Variation relative	Valeur initiale	Variation relative
IS	MI	Ma	180	-30%	770	-10%	50	150%
		Ch	330	-40%	840	-10%	80	160%
MP	TER	Ma	40	-40%	240	-10%	0	760%
		Tr	80	-30%	280	-10%	20	-20%
MT	HLM	Ma	100	-60%	130	-10%	20	-120%
		Tr	190	-50%	180	-10%	70	-10%
	MI	Ma	180	-60%	700	-10%	70	-80%
		Ch	350	-50%	810	-10%	110	0%
MTv	HLM	Ma	100	-40%	130	-40%	20	-130%
		Tr	190	-30%	180	-30%	70	40%
TIM25	TER	Ma	40	-40%	240	-10%	0	2470%
		Tr	80	-20%	280	-10%	20	20%

TABLE 5.3 – Variation des indicateurs absolus pour les bâtiments non isolés

Le tableau 5.3 présente les critères absolus. Comme prévu, on constate que les technologies testées permettent bien de diminuer les besoins de chauffage dans tous les cas. La technologie la plus efficace de ce point de vue est le mur Trombe non ventilé qui permet de réduire les besoins de plus de 50%.

Cependant, la réduction du potentiel inexploité (2e colonne) n'est pas significative (de l'ordre de 10%) excepté dans le cas du mur Trombe ventilé qui entraîne une baisse de 30 à 40% de cette grandeur. Ceci signifie que pour la majeure partie des technologies testées, les gains obtenus sur le besoin ne sont pas principalement dus à une meilleure exploitation du potentiel solaire, mais à un gain classique d'isolation lié à la modification de la paroi d'origine.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

En ce qui concerne l'impact global du soleil dans chacun des cas, plusieurs tendances se dégagent. On rappelle que l'impact était positif dans tous les cas initiaux, sans technologie, montrant ainsi que le bilan global des apports solaires sur tous les besoins énergétiques (chauffage et rafraîchissement) était positif dans le cas des bâtiments non isolés. Les différentes situations constatées sont résumées ci-dessous :

- L'impact augmente largement. C'est le cas pour l'installation solaire uniquement.
- L'impact diminue, mais reste positif. C'est ce que l'on peut constater avec le mur pariéto-dynamique à Trappes (la variation constatée à Marseille est non significative du fait de la faiblesse de la valeur initiale de ce critère).
- L'impact diminue et devient très faible, voire négatif : c'est le cas du mur Trombe ventilé et non ventilé à Marseille,
- La technologie a peu d'influence sur l'impact du soleil. C'est notamment le cas pour l'isolation transparente ou le mur Trombe dans les climats plutôt froids.

5.2.3.2 Variation des indicateurs relatifs

Techno	Bâti	Météo	Taux de couverture		Taux d'exploitation			Taux de génération	
			Valeur initiale	Variation absolue	Valeur initiale	Variation absolue	Variation idéale	Valeur initiale	Variation absolue
IS	MI	Ma	30%	20%	10%	10%	30%	90%	-70%
		Ch	20%	30%	10%	20%	40%	100%	-40%
MP	TER	Ma	20%	10%	0%	0%	20%	70%	0%
		Tr	20%	0%	10%	0%	20%	100%	0%
MT	HLM	Ma	40%	30%	30%	10%	50%	90%	0%
		Tr	30%	20%	30%	10%	70%	100%	0%
	MI	Ma	30%	30%	10%	0%	30%	100%	0%
		Ch	20%	20%	10%	10%	40%	100%	0%
MTv	HLM	Ma	40%	30%	30%	30%	50%	90%	0%
		Tr	30%	20%	30%	20%	70%	100%	0%
TIM25	TER	Ma	20%	20%	0%	0%	20%	70%	20%
		Tr	20%	10%	10%	10%	20%	100%	0%

TABLE 5.4 – Variation des indicateurs relatifs pour les bâtiments non isolés

Le tableau 5.4 montre l'évolution des indicateurs de performance relatifs. On remarque que dans tous les cas, le taux de couverture des besoins par le soleil augmente, ce qui confirme l'utilité de ces technologies quant au critère classique de diminution des besoins de chauffage.

En revanche l'efficacité de ces technologies en termes d'exploitation du potentiel solaire n'est pas évidente : la deuxième colonne montre que la progression du taux d'exploitation est assez faible, voire nulle. Dans tous les cas, elle se situe largement en deçà d'une progression « idéale » qui permettrait de s'approcher des taux de couverture de 100%. Seuls l'installation solaire et le mur Trombe ventilé permettent une amélioration de 20 à 30% du taux d'exploitation. On peut noter que ces deux technologies utilisent un vecteur fluide pour transporter la chaleur (ainsi que du stockage pour l'installation solaire).

Enfin, les taux de génération ne varient que dans deux cas. L'installation solaire permet une diminution de 40 à 70% du taux de génération des besoins (c'est ce qui explique la variation positive de l'impact global) alors qu'au contraire, l'isolation transparente augmente le taux de génération des besoins de rafraîchissement par le soleil de 20%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2.4 Conclusion : des solutions solaires généralement peu bio-climatiques

Ces résultats permettent de montrer l'intérêt d'une analyse sur des technologies d'enveloppe à l'aide des indicateurs développés. Si toutes les technologies testées sont efficaces du point de vue du critère classique (à savoir qu'elles permettent de diminuer les besoins de chauffage), l'analyse des indicateurs de performance montre qu'il reste des progrès à faire en termes d'exploitation du potentiel solaire. En effet, dans la plupart des cas, l'augmentation du taux d'exploitation n'est vraiment pas significative et ne permet pas de diminuer suffisamment les besoins de chauffage pour approcher des taux de couverture de 100%. De plus certaines technologies dégradent l'impact global du soleil sur le bâtiment. C'est le cas du Mur Trombe (ventilé ou non) à Marseille alors qu'il permet une baisse sensible des besoins de chauffage. Cela peut notamment guider des stratégies de conception vers plus de soin concernant l'utilisation de ces technologies hors-saison de chauffage. Enfin, certaines technologies comme l'isolation transparente et le mur pariéto-dynamique ne sont clairement pas performantes puisqu'elles ne permettent l'augmentation ni du taux de couverture ni du taux d'exploitation dans leur intégration actuelle.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.3 L'optimisation numérique : un outil d'aide à la conception

La mise en place d'indicateurs de potentiel des ressources et de performance bioclimatique des bâtiments a permis d'aborder la question de l'exploitation des ressources de l'environnement de manière objective et détaillée, mêlant plusieurs critères complémentaires. En effet, les indicateurs sont définis à partir de la concomitance entre ressources et besoins et à partir de la comparaison entre le comportement du bâtiment avec et sans ressource, que l'impact soit positif ou négatif. Ainsi, les résultats obtenus ne proviennent pas de préjugés ou de supposées considérations sur les facteurs favorables à l'exploitation des ressources mais bien de critères objectifs que l'on peut qualifier et quantifier.

On peut vouloir utiliser cette approche pour définir, de manière objective, ce que seraient les caractéristiques de l'enveloppe d'un bâtiment qui exploiterait au mieux les ressources de son environnement. Il s'agit alors d'optimiser la conception du bâtiment, non pas seulement en fonction des besoins énergétiques résiduels, mais également en fonction des critères de performance bioclimatique. Les méthodes classiques d'optimisation numérique peuvent être utilisées. Dans notre cas, l'optimisation sera réalisée à l'aide du logiciel Dymola et de son extension « Optmization » ([Pfeiffer, 2012]).

L'optimisation d'un modèle de bâtiment est un processus assez complexe où chaque étape compte. Un grand soin doit être apporté au paramétrage que ce soit dans le choix de la méthode en elle-même, dans le choix des critères d'optimisation, ou dans le choix des paramètres à optimiser

5.3.1 Choix de la méthode d'optimisation : l'algorithme génétique

5.3.1.1 Méthodes locales et méthodes globales

Un problème d'optimisation a pour but de trouver la meilleure paramétrisation possible d'une fonction, ou d'un modèle, permettant d'obtenir une valeur optimale de cette fonction, ou d'une sortie du modèle. Généralement, l'optimisation est formulée comme une un problème de minimisation :

$$\min(y(x)) \quad \text{avec} \begin{cases} x \in \mathbf{R}^n \\ C(x) \leq 0 \end{cases}$$

y est la fonction à optimiser. Elle est appelée « fonction coût », ou « fonction objectif », ou encore « critère d'optimisation ». x est l'ensemble des paramètres de la fonction, ou du modèle. C représente l'ensemble des contraintes portant sur ces paramètres.

Deux grandes familles de méthodes d'optimisation existent ([Cherruault, 1999]) : les méthodes locales et les méthodes globales.

Les méthodes locales permettent de trouver un optimum local de la fonction à optimiser, et sont principalement basées sur le calcul de la dérivée de cette fonction ([Ciarlet, 1982]). Parmi elles on trouve la méthode de la plus forte pente, la méthode de Newton, la méthode du gradient conjugué, les méthodes quasi newtoniennes.

Les méthodes globales visent au contraire à converger vers un optimum global. Une partie de ces méthodes est basée sur les algorithmes de recherche locale qui sont alors modifiés pour pénaliser des solutions locales déjà trouvées : c'est le cas des méthodes de descentes généralisées par exemple. Les autres

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

méthodes sont basées sur une approche plus exploratrice qui ne repose pas sur la dérivation de la fonction coût. Cette propriété se révèle très utile dans le cas de problèmes complexes, comme la simulation du comportement thermique des bâtiments, qui ne peuvent pas toujours être résolus de manière analytique. La recherche d'un optimum peut alors être énumérative (on teste tous les cas possibles), aléatoire (on effectue des tirages au hasard) ou évolutionnaire (l'ensemble des solutions possibles évolue à chaque étape de l'algorithme). On comprend aisément que les méthodes énumératives ne peuvent s'appliquer qu'à des problèmes où l'ensemble des paramètres est fini et très restreint, tandis que l'efficacité des méthodes de recherche aléatoire, très coûteuses en temps de calcul, est limitée. Les algorithmes évolutionnaires sont basés sur les principes de l'évolution naturelle selon laquelle les gènes favorisant la survie ou la reproduction au sein d'une population d'individus ont plus de chance d'être transmis à la génération d'individus suivante. Parmi les méthodes évolutionnaires, l'algorithme génétique permet une exploration rapide et globale d'un espace de recherche de taille importante. Pour cette raison il est souvent utilisé dans l'optimisation de systèmes complexes comme on peut qualifier les modèles de bâtiment et il est régulièrement utilisé, notamment pour le dimensionnement des système des chauffage et de ventilation ([Chantrelle *et al.*, 2011]).

5.3.1.2 Principe de l'algorithme génétique

Comme toutes les méthodes évolutionnaires, l'algorithme génétique est basé sur le principe de la sélection naturelle : les individus les mieux adaptés aux besoins de la population ont une plus grande longévité. L'idée de base de l'algorithme génétique est donc de reproduire les phénomènes biologiques conduisant à « l'amélioration » d'une population de départ par rapport à un critère donné (la fonction cible). Cette méthode est basée sur la combinaison de quatre opérations : classement, sélection, croisement et mutation ([Goldberg, 1994]).

1. **Classement** : On part donc d'une population de départ aléatoirement générée : chaque individu de cette population possède son propre génome, c'est à dire l'ensemble des valeurs prises par les paramètres du modèle. La valeur du critère d'optimisation est calculée pour chacun des individus qui sont alors classés les uns par rapport aux autres.
2. **Sélection** : Les individus fournissant les meilleures valeurs du critère d'optimisation sont conservés tandis que les autres sont retirés de la population.
3. **Croisement** (ou recombinaison, ou enjambement) : Les meilleurs individus sont alors « croisés » : on combine leurs génomes afin d'obtenir de nouveaux individus qui sont insérés dans la population d'origine, et qui concourent alors à la définition d'une nouvelle population.
4. **Mutation** : Enfin, certains paramètres du génome des individus de la nouvelle population sont perturbés de manière aléatoire. Cette perturbation doit être assez faible de manière à ne pas tomber dans une recherche aléatoire et conserver le principe de sélection et d'évolution. La mutation sert à éviter une convergence prématurée de l'algorithme. Par exemple lors d'une recherche d'extremum la mutation sert à éviter la convergence vers un extremum local.

On obtient une première génération constituée d'une nouvelle population à laquelle on applique le même principe de classement, sélection, croisement et mutation. Au bout d'un certain nombre de générations, le processus s'arrête et le meilleur individu est alors présenté comme individu optimal. L'algorithme génétique ne nous permet donc pas d'affirmer avec certitude que la solution obtenue est la meilleure, dans l'absolu, mais elle permet au-moins de trouver une solution globale qui minimise le

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

critère d'optimisation choisi. La pertinence de cette solution dépendra du nombre d'évaluations de ce critère, c'est-à-dire, dans notre cas, du nombre de simulations.

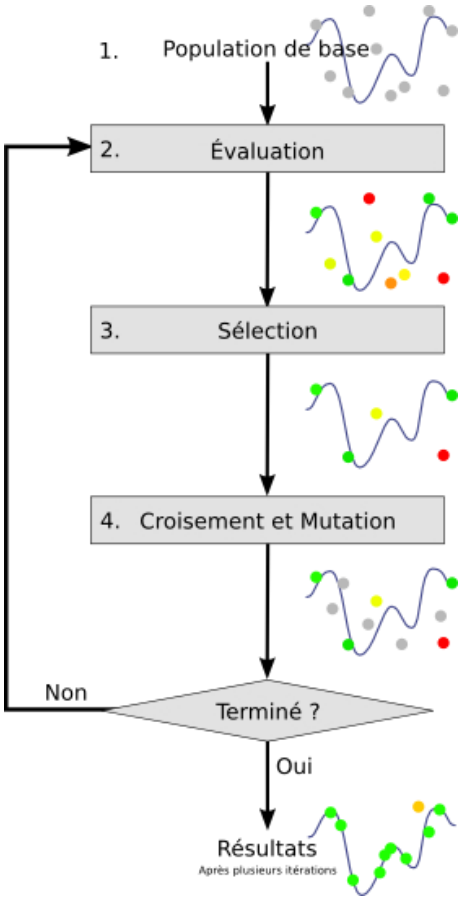

FIGURE 5.10 – Schéma de principe de l'algorithme génétique

5.3.1.3 Choix du paramétrage de l'algorithme

L'utilisation de l'algorithme génétique requiert le renseignement par l'utilisateur de deux paramètres :

- Le nombre d'individus dans la population d'origine n,
- Le nombre de générations m.

Ce paramétrage est très important car il va conditionner l'étendue des recherches conduisant à la détermination d'une solution optimale. En pratique, le produit de ces deux paramètres détermine le nombre de simulations requises pour mener l'optimisation : plus le nombre de simulations est important, plus le champ des recherches est élargi, plus on a de chances de trouver une meilleure solution. En revanche, l'augmentation du nombre de simulations entraîne évidemment une augmentation du temps de calcul. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre pertinence de la solution et mobilisation des moyens numériques. Le package « Optmization » de Dymola fixe la limite maximale du nombre de simulations à 1000. Plusieurs couples (n,m) sont possibles pour atteindre cette valeur et une analyse a été menée afin de déterminer le couple permettant d'atteindre la meilleure solution.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

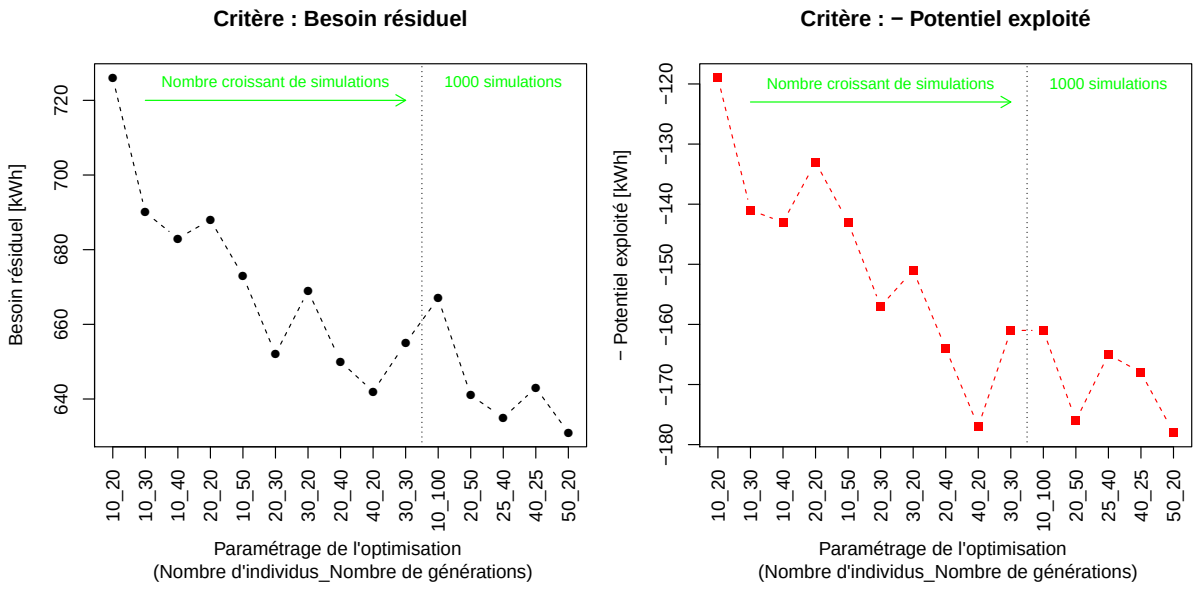

FIGURE 5.11 – Évolution du besoin résiduel optimal et de l'opposé du potentiel exploité optimal de la maison INCAS en version non isolée sur une semaine d'hiver, en fonction du paramétrage de l'algorithme génétique dans Dymola

La figure 5.11 montre l'évolution de la valeur optimale des deux critères (besoin résiduel et potentiel exploité) en fonction du couple (n,m) choisi pour l'optimisation à l'aide de l'algorithme génétique sur une semaine d'hiver. On constate tout d'abord qu'une augmentation du nombre de simulations entraîne globalement la diminution du besoin résiduel et donc une amélioration de l'optimisation. Pour un nombre de simulations constant (à partir de 1000 par exemple), on voit que l'optimisation s'améliore globalement lorsque le nombre d'individus dans la population de départ augmente. On constate que le paramétrage qui permet d'obtenir la plus faible valeur pour les deux critères est le couple (50 individus dans la population de base, 20 générations). C'est donc celui qu'on utilisera dans la suite de l'analyse.

5.3.2 Choix des critères d'optimisation

Le critère d'optimisation (ou fonction objectif) est la fonction de sortie du modèle que l'on cherche à minimiser grâce à l'algorithme génétique. La plupart des travaux cherchant à optimiser la conception d'un bâtiment se basent sur la minimisation de la consommation résiduelle ou sur la minimisation des périodes d'inconfort (température intérieure du bâtiment au-delà d'une plage de températures fixée) lorsque le bâtiment n'intègre pas de système énergétique pour gérer ce problème. Ce que nous souhaitons dans cette thèse, c'est optimiser la conception d'un bâtiment en cherchant à minimiser le besoin résiduel tout en maximisant l'exploitation du potentiel des ressources. Nous verrons ensuite comment cette évolution des critères d'optimisation fait évoluer les solutions optimales.

Les deux critères d'optimisation retenus pour la suite de l'étude seront donc :

- La minimisation des besoins de chauffage résiduels, B_C, en valeur intégrée sur la période d'optimisation.
- La minimisation de l'opposé du potentiel solaire exploité, $-Pexp_{C,s}$, en valeur intégrée sur la période d'optimisation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.3.3 Choix des paramètres du modèle à optimiser

Le choix de l'algorithme génétique impose de limiter au maximum la complexité du modèle de bâtiment à optimiser afin de réduire les temps de calcul pour pouvoir effectuer un grand nombre de simulations dans un temps raisonnable. On souhaite ainsi que l'ensemble des paramètres du modèle soit représentatif des phénomènes physiques qui définissent le comportement thermique du bâtiment, tout en étant limité en nombre afin de maximiser la convergence vers un optimum global.

5.3.3.1 Simplification du modèle physique

De nombreux travaux se sont attachés à l'optimisation de l'enveloppe d'un bâtiment. Parmi les paramètres testés, on peut citer le pourcentage de parois vitrées ([Gasparella *et al.*, 2011] et [Leskovar et Premrov, 2012]), le niveau d'isolation ([Pereira et Ghisi, 2011] et [Özkan et Onan, 2011]), les caractéristiques optiques des vitrages ([Gasparella *et al.*, 2011]). La méthode utilisée ici se voulant complète et sans a priori, nous voulons tester le plus grand nombre de paramètres relatifs aux caractéristiques physiques des composants d'enveloppe, quitte pour cela à devoir simplifier les éléments géométriques. Typiquement, la géométrie adoptée est celle dite de la « boîte à chaussure », c'est à dire celle d'un parallélépipède rectangle.

Même en adoptant une telle géométrie, le nombre de paramètres est encore très élevé : un parallélépipède compte six parois, qu'on doit encore subdiviser en parois opaques et parois vitrées. En comptant raisonnablement sept à huit paramètres conductifs, convectifs et radiatifs (décrits dans la suite) pour chacune des parois, on atteint facilement quatre-vingts à quatre-vingt dix paramètres d'enveloppe. Il sera alors nécessaire de réduire cet ensemble aux seuls paramètres les plus influents pour espérer une convergence globale de l'optimisation. Cette sélection peut s'effectuer en réalisant une analyse de sensibilité qui détermine l'influence des paramètres du modèle sur chacun des critères d'optimisation considérés.

À partir de cette analyse de sensibilité on obtiendra alors deux listes de paramètres les plus influents : une liste pour les besoins résiduels et une liste pour le potentiel exploité. Dans l'optique de pouvoir comparer les valeurs des paramètres obtenus par l'optimisation de chacun des deux critères, l'ensemble des paramètres à optimiser sera constitué de l'union des deux listes. Les résultats de l'analyse de sensibilité permettront alors d'arbitrer les valeurs des paramètres en fonction de leur influence sur chacun des critères.

5.3.3.2 Modèle de bâtiment

L'optimisation de l'enveloppe est réalisée ici à l'aide du logiciel Dymola et plus précisément de son package « Optimization » dans lequel est implantée la méthode basée sur l'algorithme génétique. Le choix d'une architecture simplifiée de bâtiment a été décidé afin de se concentrer sur l'enveloppe sans ajouter de paramètres superflus relatifs à la disposition intérieure du bâtiment (plancher entre deux étages, cloisons intérieures, etc). La recherche d'une valeur optimale de chaque caractéristique s'effectue à l'intérieur d'une plage de valeurs définie par des contraintes physiques. Dans notre étude, les intervalles de valeurs des caractéristiques d'enveloppe ont été choisis en fonction des recommandations données par la RT2005 ([RT2, b]). Il sont caractérisés dans les tableaux suivants par une valeur minimum x_{min}, une valeur maximum x_{max}, et une valeur moyenne x_{moy}.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.3.3.2.1 Géométrie

L'étude a été réalisée sur un modèle de bâtiment simplifié type « boîte à chaussures », un parallélépipède rectangle monozone aux dimensions de la maison INCAS ($6.5 \times 7.5 \times 6\,\mathrm{m}$). La face supérieure (le plafond) et les quatre faces latérales (les murs) comportent une partie opaque et une partie vitrée. Le pourcentage de paroi vitrée est un paramètre de l'optimisation. La face inférieure (le plancher) est constitué uniquement d'une partie opaque.

5.3.3.2.2 Description des parois

Deux versions de bâtiment ont été simulées : une version bien isolée et une version mal isolée. On cherche ainsi à voir quel est le résultat de l'optimisation selon le niveau d'isolation de départ. Pour réduire le nombre de paramètres, le bâtiment est constitué de parois monocouches. Un premier essai avec des parois multi-couches (2 couches) n'a en effet pas montré de différence dans l'optimisation des paramètres des différentes couches.

Parois opaques Les parois opaques sont traditionnellement paramétrées à l'aide de trois coefficients :

- Leur épaisseur e (en m),
- Leur résistance thermique R (en $\mathrm{m^2{\cdot}K/W}$) ou leur coefficient de transmission thermique U (en $\mathrm{W/(m^2{\cdot}K)}$),
- Leur capacité thermique massique C_p (en $\mathrm{J/(K{\cdot}kg)}$)

Cependant ce paramétrage n'est pas idéal car ces trois paramètres ne permettent pas vraiment de dissocier les différents phénomènes qui s'opèrent au sein de la paroi. On préfère pour cela opter pour des paramètres plus représentatifs des différents phénomènes dynamiques entrant en jeu dans la diffusion de la chaleur à travers les parois. Les parois seront donc caractérisées par la combinaison de trois autres coefficients :

- Leur résistance thermique R (en $\mathrm{m^2{\cdot}K/W}$) qui caractérise la capacité de la paroi à s'opposer à un flux de chaleur la traversant.
- Leur diffusivité thermique D (en $\mathrm{m^2/s}$), qui caractérise la vitesse à laquelle se diffuse un flux de chaleur dans la paroi.
- Leur effusivité thermique E (en $\mathrm{J{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}{\cdot}s^{-1/2}}$), qui caractérise la vitesse à laquelle la paroi absorbe le flux de chaleur.

Ces trois paramètres se déduisent des paramètres classiques selon les formules suivantes :

$R = \frac{e}{\lambda}$ avec λ la conductivité thermique de la paroi en $\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$
$D = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ avec ρ la masse volumique de la paroi en $\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$
$E = \sqrt{\lambda \rho C_p}$

On a vu précédemment que l'impact sur les besoins de chauffage résiduels du point de résistance thermique supplémentaire était décroissant lorsque la valeur de R augmentait. L'influence d'une variation de la valeur de R est importante lorsque R est faible, et cette influence est négligeable lorsque R est élevée. Dans la suite, on choisira donc de séparer l'optimisation en deux parties : on optimisera d'un côté une version mal isolée de la maison INCAS, et de l'autre côté une version bien isolée. L'intégralité des caractéristiques thermiques et radiatives des parois opaques est donnée dans le tableau 5.5.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Paramètre	x_{min}	x_{max}	x_{moy}
Résistance thermique R $(\mathrm{m^2{\cdot}K{\cdot}W^{-1}})$ (mal isolée / bien isolée)	0.01 / 1	1 / 5	0.505 / 3
Diffusivité thermique D $(\mathrm{m^2{\cdot}s^{-1}})$	10^{-7}	10^{-6}	$5.5.10^{-7}$
Effusivité thermique E $(\mathrm{J{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}{\cdot}s^{-1/2}})$	30	2000	1015
Coefficient d'échange superficiel extérieur h_{ext} $(\mathrm{W{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}})$	10	30	20
Coefficient d'échange superficiel intérieur h_{int} $(\mathrm{W{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}})$	5	15	10
Taux d'absorption en CLO α	0.01	0.9	0.455
Émissivité extérieure en GLO $\varepsilon_{\mathrm{ext}}$	0.01	0.9	0.455

TABLE 5.5 – Propriétés des parois opaques dans le modèle à optimiser

Parois vitrées Les valeurs minimales, maximales, et moyennes des caractéristiques thermiques et optiques (vis à vis du rayonnement solaire) des parois vitrées sont données dans le tableau 5.6. Comme pour les parois opaques on a défini deux niveaux d'isolation des vitrages par l'intermédiaire de leur coefficient de transfert thermique (conductif) U.

Paramètre	x_{min}	x_{max}	x_{moy}
Coefficient de transfert thermique U $(\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}})$ (mal isolée / bien isolée)	3 / 0.1	5 / 3	4 / 1.55
Coefficient d'échange superficiel extérieur h_{ext} $(\mathrm{W{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}})$	10	30	20
Coefficient d'échange superficiel intérieur h_{int} $(\mathrm{W{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}})$	5	15	10
Taux d'absorption en CLO du flux direct α_{dir}	0.01	0.9	0.455
Taux de transmission en CLO du flux direct τ_{dir}	0.01	0.9	0.455
Taux d'absorption en CLO du flux diffus α_{dif}	0.01	0.9	0.455
Taux de transmission en CLO du flux diffus τ_{dif}	0.01	0.9	0.455
Émissivité extérieure en GLO $\varepsilon_{\mathrm{ext}}$	0.01	0.9	0.455

TABLE 5.6 – Propriétés des parois vitrées dans le modèle à optimiser

5.3.3.2.3 Systèmes de climatisation et ventilation

Les températures de consigne en chauffage (entre 18 et 22 °C) et rafraîchissement (entre 23 et 26 °C) seront utilisées comme paramètres de l'optimisation ainsi que le taux de renouvellement d'air (entre 0.5 et 4 vol/h) et l'efficacité (entre 0.001 et 0.75) de l'échangeur du système de ventilation double-flux.

5.3.3.2.4 Conditions limites

Le plancher est considéré comme reposant sur un vide sanitaire très fortement ventilé. La condition limite est donc uniquement une condition en température (température extérieure). Les conditions aux limites pour les autres faces sont des conditions de température (température extérieure et température de ciel) et de flux (rayonnement solaire incident).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.3.3.3 Sélection des paramètres les plus influents : analyse de sensibilité

En considérant le modèle simplifié de bâtiment présenté dans la partie précédente, on obtient encore quatre-vingt neuf paramètres à optimiser. Pour réduire cet ensemble aux paramètres les plus influents, et améliorer ainsi la convergence du modèle vers une solution d'optimisation globale, on s'appuiera sur une analyse de sensibilité. Cette méthode doit permettre de quantifier la variation de chaque critère d'optimisation (besoin résiduel et potentiel exploité) en fonction de la variation de chaque paramètre.

5.3.3.3.1 Méthode de l'analyse de sensibilité

Pour évaluer l'influence d'un paramètre x sur un critère d'optimisation y, on calcule en fait la sensibilité de ce critère y aux variations de x, à l'aide d'un indice de sensibilité. La valeur de cet indice de sensibilité est dépendant de la plage de variation choisie pour x. Il va donc être nécessaire de calculer, pour chaque paramètre, plusieurs indices de sensibilité différents pour vérifier que leur valeur est indépendante de la plage de variation de x. Les paragraphes suivants présentent la méthode de calcul de l'indice de sensibilité ainsi que les différents tests de convergence réalisés.

Indice de sensibilité Dans la description du modèle de bâtiment, on a défini, pour chaque paramètre x, un intervalle de valeurs borné par une valeur minimale x_{min} et une valeur maximale x_{max}. Cet intervalle permet de définir une valeur moyenne x_{moy} pour chaque paramètre. La plage de variation Δx de chaque paramètre est ensuite définie à partir d'une variation v en pourcentage :

$$\Delta x = v(x_{max} - x_{min})$$

Chaque paramètre x est maintenant décrit par sa valeur moyenne x_{moy} et par son intervalle de variation Δx, dépendant de la variation v. On peut alors calculer la valeur $y(x_{moy})$ du critère y correspondant à la valeur moyenne de tous les paramètres. On calcule également la valeur du critère y pour une variation de chaque paramètre x, les autres paramètres du modèles étant fixés à leur valeur moyenne :

$$y(x_{moy} + \frac{\Delta x}{2})$$
et
$$y(x_{moy} - \frac{\Delta x}{2})$$

La différence Δy entre ces deux quantités nous donne la réponse du critère y à une variation de Δx du paramètre x. Pour calculer l'influence du paramètre x sur le critère y, on définit alors l'indice de sensibilité S_{yx} :

$$S_{yx} = \frac{\Delta y / y(x_{moy})}{\Delta x / x_{moy}} \tag{5.1}$$

L'indice de sensibilité exprime donc le pourcentage de variation du critère y en fonction d'un pourcentage de variation d'un paramètre x à l'intérieur de sa plage de valeur. Cette quantité est adimensionnelle et on peut ordonner les différents paramètres en fonction de leur indice de sensibilité exprimé en valeur absolue. Les paramètres les plus influents sont ceux dont l'indice de sensibilité est le plus grand. La sélection des paramètres à retenir pour l'optimisation peut se faire de différentes manières. On peut choisir par exemple de retenir un nombre fixé de paramètres ou encore d'éliminer les paramètres en deçà

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

d'un certain niveau de sensibilité. Ici, nous avons choisi de retenir comme paramètres influents ceux dont la valeur de l'indice de sensibilité est supérieure à 10% de la valeur de l'indice de sensibilité maximum.

Tests de convergence Afin de s'assurer de l'indépendance des indices de sensibilités par rapport à la plage de variation de chaque paramètre, on effectue plusieurs analyses de sensibilités correspondant à plusieurs valeurs de variation v (0.01%, 0.1%, 1%, 5% et 10%). On compare ensuite le nombre de paramètres retenus dans chacun des cas, et ce pour les deux critères d'optimisation définis précédemment : le besoin de chauffage résiduel B_C et l'opposé du potentiel solaire exploité $-Pexp_{C,s}$.

On réalise tout d'abord les tests de convergence sur une année entière. Les résultats sont présentés sur la figure 5.12.

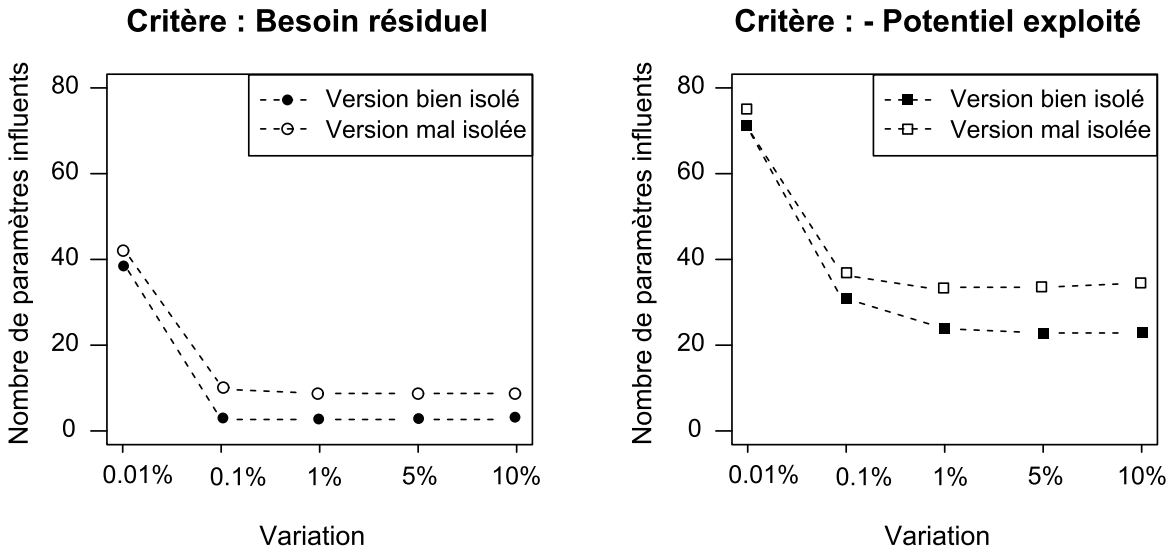

FIGURE 5.12 – Nombre de paramètres retenus sur l'année pour les différentes sensibilités testées

Les courbes montrent que la méthode est stable au-moins pour les trois plus grandes variations, que ce soit pour les besoins résiduels ou pour le potentiel exploité. Pour les besoins résiduels, seule la plus petite variation donne un nombre de paramètres différents des autres. Dans le cas du potentiel exploité, les résultats sont moins nets mais on voit que le nombre de paramètres influents est relativement stable à partir d'une variation de 1%. Dans tous les cas, le nombre élevé de paramètres pour les faibles variations peut s'expliquer par le manque de précision numérique des logiciels qui, aux faibles valeurs de sensibilité, doivent traiter un nombre de chiffres significatifs dépassant leurs capacités. On remarque que le nombre de paramètres influents est plus élevé dans la version mal isolée que dans la version bien isolée, et il est plus élevé lorsqu'on prend le potentiel exploité comme critère que lorsqu'on prend les besoins résiduels.

On peut également réaliser cette analyse à l'échelle du mois (résultats présentés sur la figure 5.13). On s'intéresse simplement à l'analyse de sensibilité en hiver et en mi-saison lorsque les valeurs des critères de besoin résiduel et de potentiel exploité sont significatives. Les résultats semblent montrer les mêmes tendances que pour l'année toute entière : le nombre de paramètres les plus influents est stable pour les trois plus fortes variations, et il est plus élevé en version mal isolée qu'en version bien isolée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

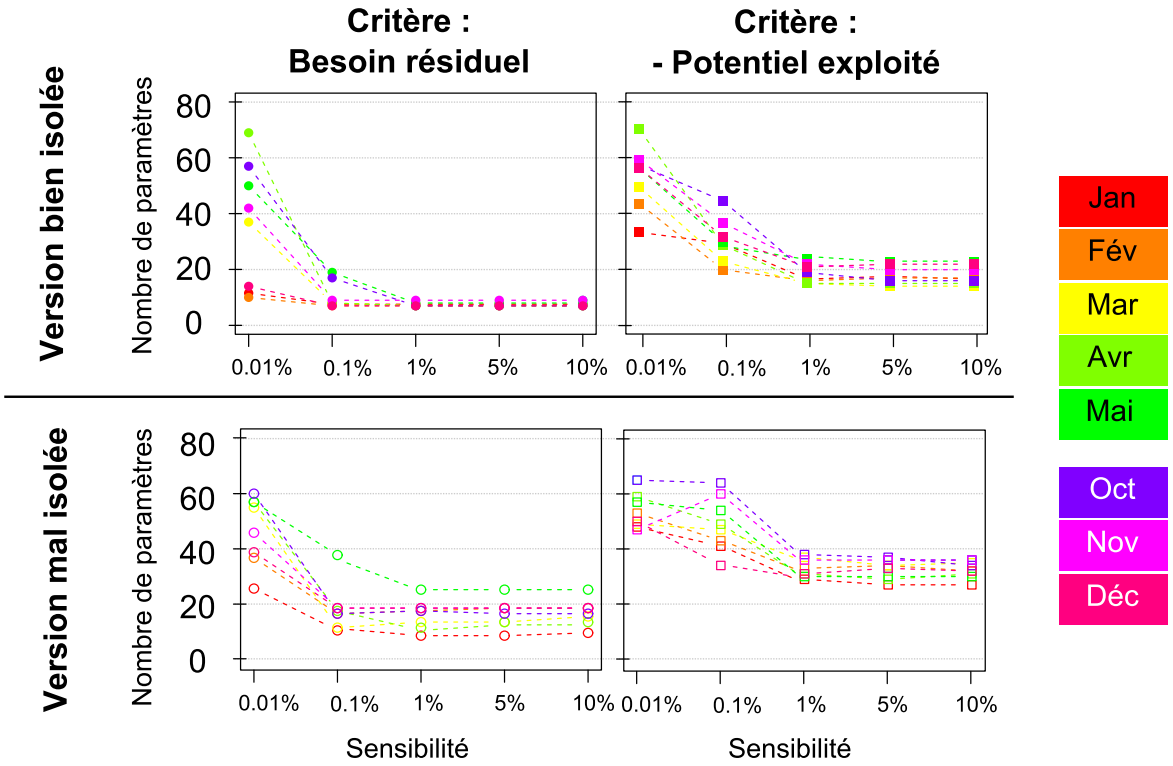

FIGURE 5.13 – Nombre de paramètres retenus sur chaque mois pour les différentes sensibilités testées

5.3.3.3.2 Résultats de l'analyse de sensibilité

Le paragraphe précédent a montré que les variations les plus importantes entraînaient un nombre de paramètres les plus influents stable. Les résultats de l'analyse de sensibilité présentés dans cette partie sont donc issus de calculs effectués avec une variation de 10% (la plus forte). On présentera tout d'abord la liste des paramètres les plus influents sur toute l'année selon le critère utilisé, et ce pour les deux versions de bâtiments (bien isolé et mal isolé), afin d'observer les éventuelles différences. Par la suite, on précisera l'analyse dans le cas particulier du mois de janvier afin de préparer l'optimisation qui sera menée sur cette période.

Résultats sur toute l'année La figure 5.14 présente les paramètres influents déterminés à partir de l'analyse de sensibilité du bâtiment en version bien isolée. La partie supérieure de la figure présente les résultats obtenus à partir du critère de besoin résiduel tandis que la partie inférieure présente les résultats obtenus à partir du critère de potentiel exploité.

On voit que les paramètres qui ont le plus d'influence sur les besoins de chauffage résiduels de la maison bien isolée sont, dans l'ordre, :

- le débit de ventilation,
- l'efficacité de l'échangeur de la ventilation double-flux,
- la résistance thermique du plancher.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

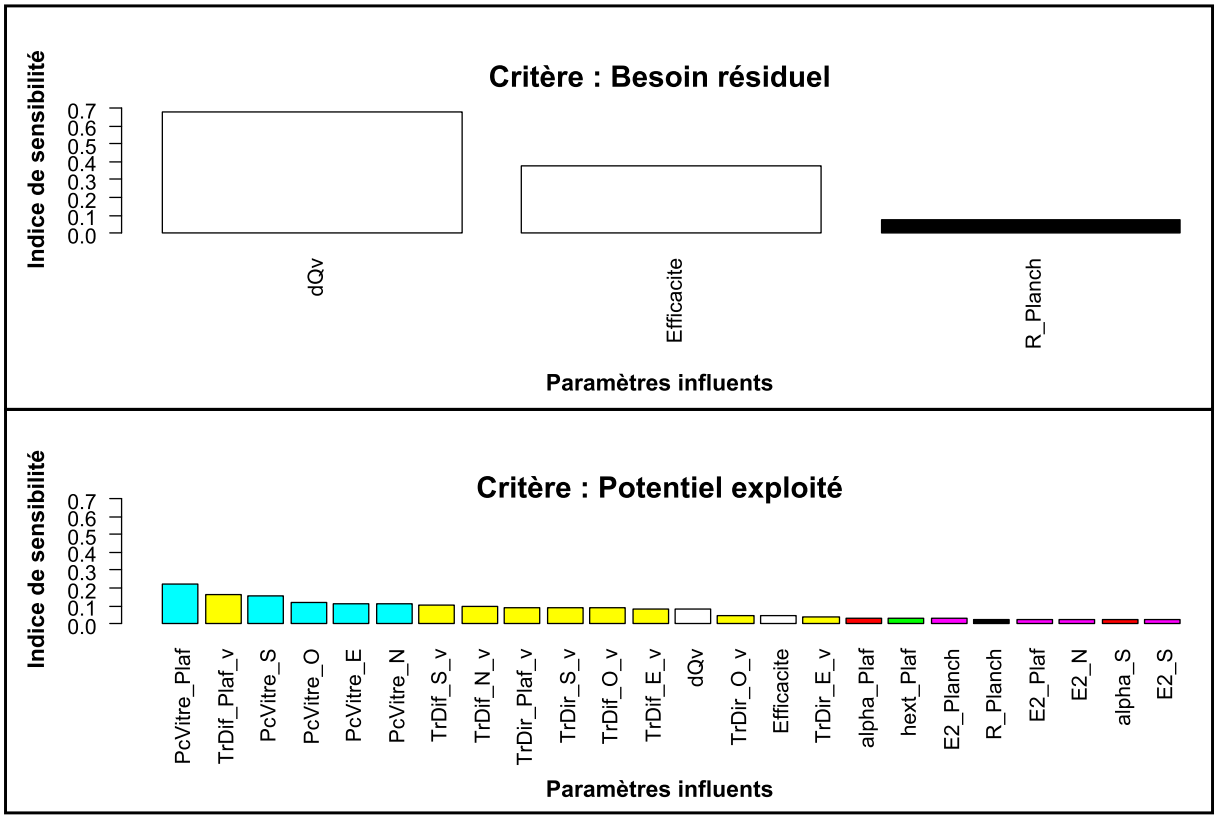

FIGURE 5.14 – Paramètres influents sur toute l'année pour la version bien isolée

Ces résultats montrent encore une fois que le principal poste de déperditions thermiques (et donc la principale cause des besoins de chauffage) d'un bâtiment bien isolé est le système de ventilation. On remarque ici que la résistance thermique de l'ensemble des parois n'est pas considérée comme un paramètre influent, ce qui montre que dans l'intervalle de valeurs choisies (entre 1 et $5\,\mathrm{m}^2{\cdot}\mathrm{K}{\cdot}\mathrm{W}^{-1}$), l'impact d'une variation du point de résistance thermique sur les besoins du bâtiment est négligeable.

Lorsqu'on prend comme critère le potentiel exploité (partie inférieure de la figure 5.14), les paramètres les plus influents sont ceux qui concernent la transmission du rayonnement solaire à l'intérieur du bâtiment par les parois vitrées. Il s'agit principalement des pourcentage de paroi vitrées sur chaque façade ainsi que des coefficients de transmission du rayonnement solaire direct et diffus. D'autres paramètres ont également une influence sur le potentiel exploité annuel du bâtiment bien isolé :

- les paramètres de la ventilation (efficacité de l'échangeur et débit de ventilation dQv),
- la résistance thermique du plancher (comme pour les besoins résiduels),
- le coefficient d'absorption du rayonnement solaire en courtes longueurs d'onde par le plafond et le mur sud,
- l'effusivité thermique de toutes les parois opaques (mis à part à l'est et à l'ouest),
- le coefficient de convection extérieure du plafond.

La figure 5.15 présente les paramètres influents déterminés à partir de l'analyse de sensibilité du bâtiment en version mal isolée. Comme précédemment, la partie supérieure de la figure présente les résultats obtenus à partir du critère de besoin résiduel tandis que la partie inférieure présente les résultats obtenus à partir du critère de potentiel exploité.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

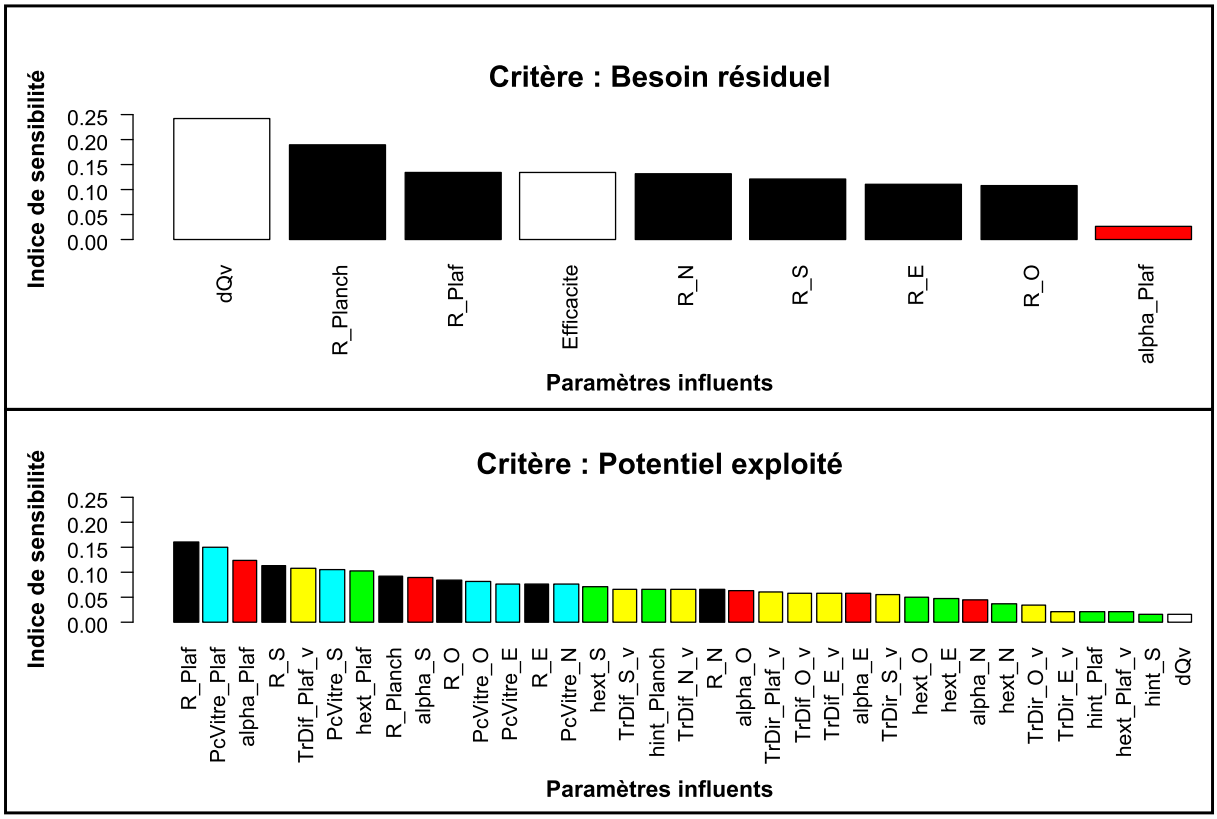

FIGURE 5.15 – Paramètres influents sur toute l'année pour la version mal isolée

La partie supérieure de la figure 5.15 nous montre que, contrairement à la version bien isolée, le degré d'isolation des parois a un impact très important sur le besoin de chauffage résiduel du bâtiment en version mal isolée (R entre 0.01 et $1\,\mathrm{m^2{\cdot}K{\cdot}W^{-1}}$). On retrouve également les deux paramètres de la ventilation même si l'efficacité de l'échangeur de la ventilation double-flux apparaît comme moins influente que les résistances thermiques du plafond et du plancher. On constate également que le taux d'absorption du rayonnement solaire en courtes longueurs d'onde du plafond est compté au nombre des paramètres influents sur le besoin résiduel de la maison mal isolée.

Comme dans le cas de la maison bien isolée, le nombre de paramètres qui ont un impact conséquent sur le potentiel exploité est plus élevé. La partie inférieure de la figure 5.15 nous montre que cinq types de paramètres peuvent être considérés comme influents. On retrouve ainsi :

- la résistance thermique des parois opaques,
- le pourcentage de paroi vitrée sur chaque face,
- les coefficients de transmission du flux solaire direct et diffus,
- les coefficients de convection extérieure des toutes les parois opaques et de la partie vitrée du plafond, ainsi que les coefficients de convection intérieure du plafond et du plancher,
- le coefficient d'absorption du rayonnement solaire de toutes les parois opaques.

On peut noter que le plancher et le plafond semblent avoir une influence plus importante que les autres parois sur les deux critères, quelle que soit la version de bâtiment. En effet, le plafond est la paroi qui reçoit le plus de rayonnement solaire durant la journée, et qui se rafraîchit le plus par rayonnement avec la voûte céleste durant la nuit. Le plancher subit également un traitement différent car il ne reçoit pas de rayonnement solaire et n'échange pas avec la voûte céleste.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Résultats en hiver (janvier) La liste des paramètres ayant une influence sur les besoins de chauffage résiduels et sur le potentiel exploité du soleil en janvier est présentée sur la figure 5.16 pour la version bien isolée et sur la figure 5.17 pour la version mal isolée. Dans les deux cas, on constate que les paramètres retenus sont sensiblement les mêmes que pour toute l'année. Ce résultat est logique puisque les besoins de chauffage résiduels et le potentiel exploité sont principalement expliqués par le comportement hivernal du bâtiment. Quelques exceptions sont cependant notables.

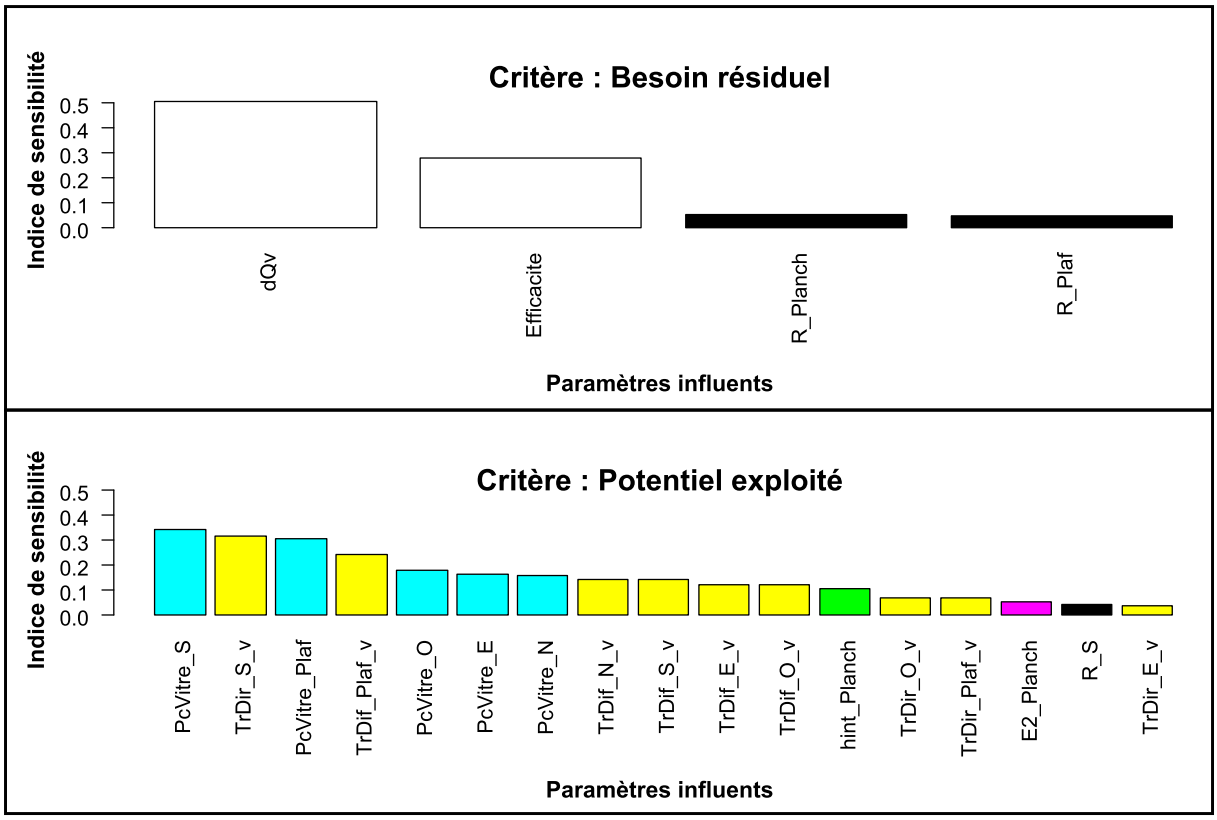

FIGURE 5.16 – Paramètres influents sur le mois de janvier pour la version bien isolée

On peut remarquer que, dans le cas de la version bien isolée (figure 5.16), la résistance thermique du plancher n'est plus la seule à être considérée comme un paramètre influent : c'est également le cas de la résistance thermique du plafond. On constate également sur la figure 5.17 que le taux d'absorption du rayonnement solaire par le plafond, qui faisait partie de la liste des paramètres ayant une influence sur les besoins résiduels annuels de la maison non isolée, n'est pas retenu pour le mois de janvier.

La partie inférieure de la figure 5.16, qui nous montre les paramètres ayant une influence sur le potentiel exploité du soleil par le bâtiment bien isolé, nous indique que les paramètres de la ventilation ne sont pas influents, contrairement à ce que montraient les résultats sur toute l'année. Ce constat est également valable pour la version non isolée (figure 5.17). De même on voit que l'effusivité des parois est beaucoup moins influente sur le mois de janvier que sur toute l'année puisque seule subsiste l'effusivité du plancher comme paramètre influent à ce niveau.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

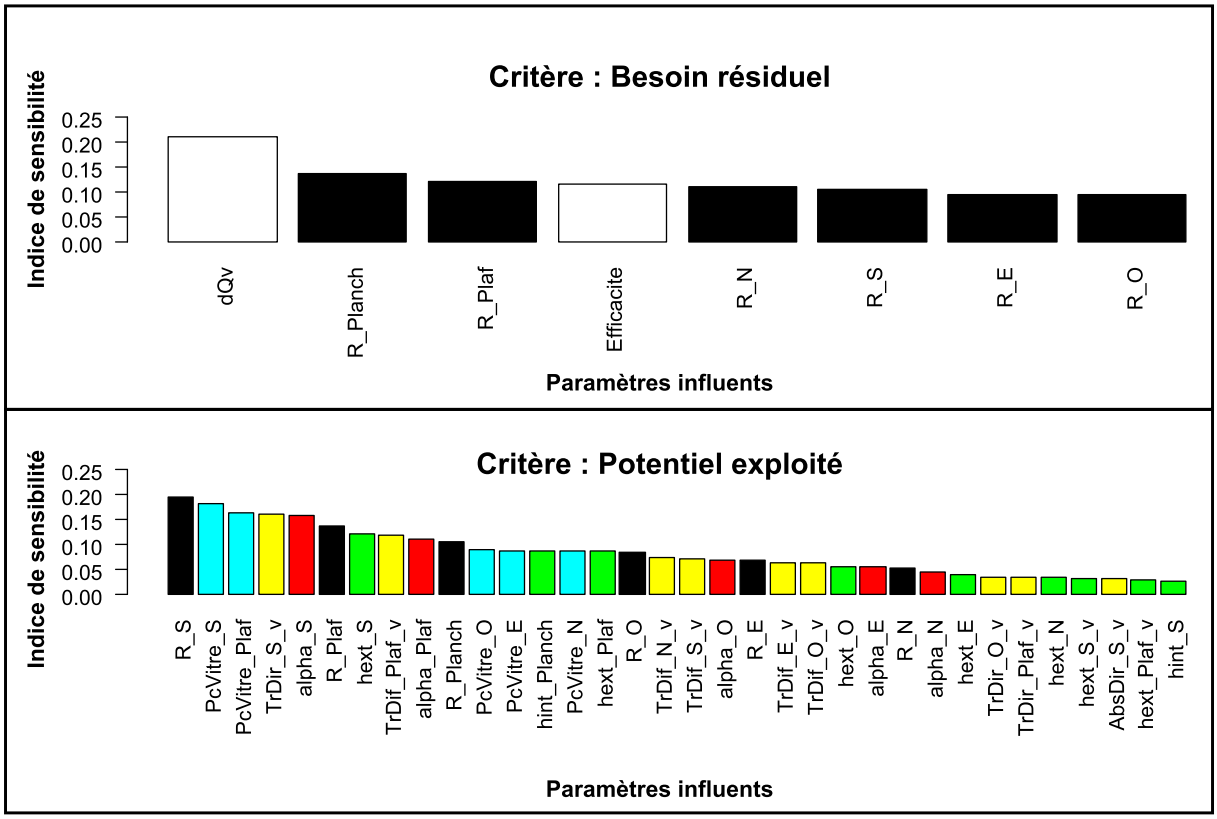

FIGURE 5.17 – Paramètres influents sur le mois de janvier la version mal isolée

Conclusion L'analyse de sensibilité a montré qu'il était possible de réduire le nombre de paramètres à optimiser : on passe en effet de 89 paramètres à une trentaine de paramètres réellement influents dans le pire des cas. Une première analyse à l'échelle de l'année entière nous a permis de constater que les paramètres à retenir n'étaient pas les mêmes lorsque l'on effectuait l'analyse avec le besoin de chauffage résiduel ou avec le potentiel exploité du soleil comme critère. On constate que, dans le cas du besoin résiduel, les paramètres les plus influents sont généralement ceux liés à la ventilation dans le cas de la maison bien isolée, et à la résistance des parois dans le cas de la maison mal isolée, alors que les paramètres retenus dans le cas du potentiel exploité sont principalement ceux liés à la transmission du flux solaire par les parois vitrées. On voit ainsi avec cette analyse que les domaines d'amélioration possible de la performance des bâtiments suivant la voie de l'isolation et la voie bioclimatique sont en grande partie disjoints. On peut donc espérer une progression complémentaire de ces deux approches pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Une analyse à l'échelle du mois de janvier nous a permis de préciser cette liste afin de préparer le paramétrage de l'optimisation sur cette période. En effet, le nombre de simulations à effectuer étant conséquent (1000 simulations pour chaque critère), on a choisi de restreindre la période d'optimisation au seul mois de janvier. L'analyse de sensibilité a montré que les paramètres les plus influents pour le mois de janvier étaient sensiblement les mêmes que pour toute l'année. À partir des listes établies précédemment pour chaque version de bâtiment, on réalise l'union des paramètres influant sur les besoins et sur le potentiel exploité afin d'optimiser les mêmes paramètres dans les deux cas. On déterminera ensuite la valeur optimale de chaque paramètre en comparant son indice de sensibilité pour les deux critères. La liste des paramètres à optimiser avec leurs indices de sensibilité est donnée en annexe B.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.3.4 Résultats de l'optimisation

Pour chaque version de bâtiment (bien isolée et mal isolée), deux optimisations ont été menées en parallèle. La première, l'optimisation par minimisation du besoin de chauffage résiduel est la pratique courante actuelle de la conception énergétique. Nous y avons ajouté un deuxième mode de conception qui consiste en une optimisation par maximisation du potentiel solaire exploité. L'ensemble des paramètres à optimiser dans chaque version de bâtiment est constitué de l'union des paramètres les plus influents dans chaque approche. Le nombre total des paramètres à optimiser dans la version bien isolée est égal à 21 et il est égal à 34 pour la version mal isolée. Pour chaque version de bâtiment, on va comparer les résultats obtenus dans les deux optimisations et essayer de trouver des points de convergence en arbitrant les éventuels contradictions à l'aide des indices de sensibilités obtenus précédemment.

5.3.4.1 Méthode d'analyse des résultats et d'arbitrage entre les critères d'optimisation

Le but de cette étape d'optimisation est de trouver un compromis acceptable entre les deux approches (minimisation des besoins et maximisation de l'exploitation). Il s'agit en fait de réaliser une optimisation multi-critères, non pas à partir d'une pondération a priori des deux critères comme c'est classiquement le cas, mais plutôt à partir d'un arbitrage sur la sensibilité des critères d'optimisation aux différents paramètres qui ont été optimisés. Nous nous intéresserons pour cela aux valeurs optimales des paramètres obtenues dans les deux cas, ainsi qu'à leur indices de sensibilité vis-à-vis du besoin et du potentiel exploité.

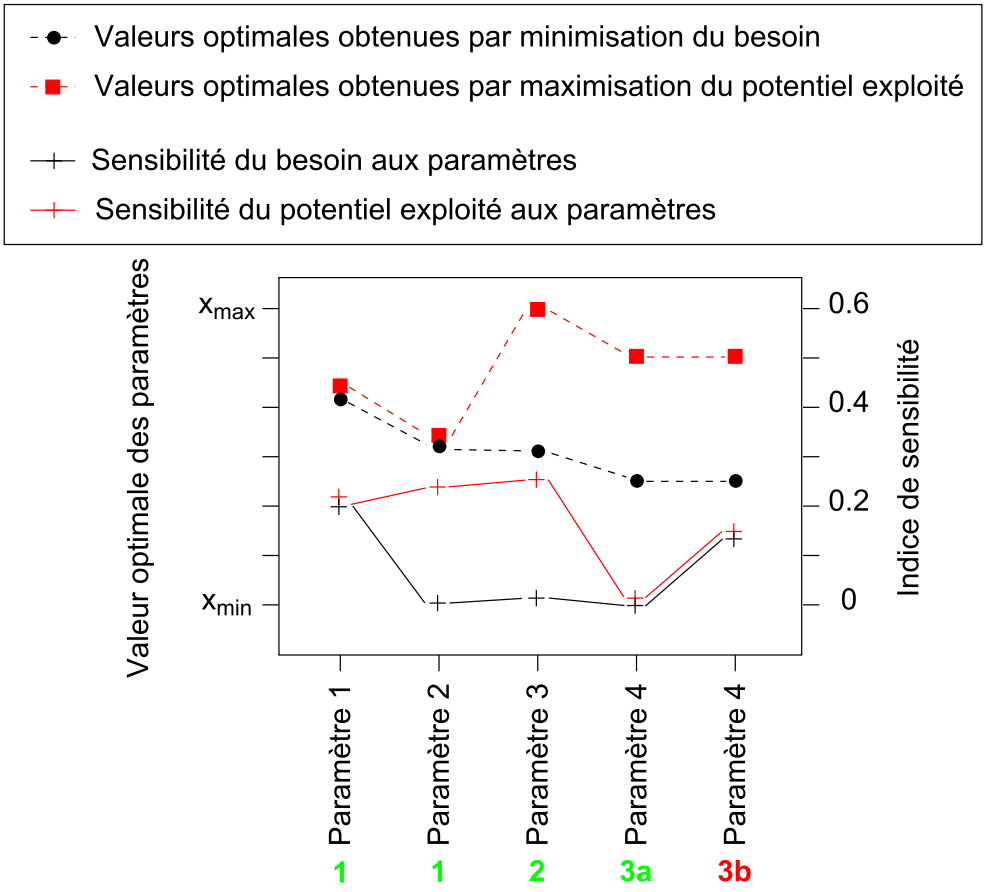

FIGURE 5.18 – Mode de présentation des résultats de l'optimisation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les résultats vont être présentés sous forme graphique. Sur un même graphique (figure 5.18), on a représenté deux types d'informations. Les courbes en pointillés représentent les valeurs optimales obtenues, d'une part, par minimisation des besoins résiduels (points noirs), et d'autre part, par maximisation du potentiel exploité (carrés rouges). L'échelle choisie pour la représentation de ces courbes (axe de gauche) correspond aux plages de variation des paramètres. Les courbes en trait plein indiquent la sensibilité de chacun des deux critères d'optimisation aux différents paramètres. Ainsi, il est possible d'analyser la convergence ou la divergence des deux optimisations en comparant les valeurs optimales et l'influence des paramètres sur les deux critères.

Plusieurs situations peuvent être rencontrées pour un paramètre donné :

1. Les deux valeurs optimales obtenues sont proches (cas des paramètres 1 et 2) : les deux approches convergent et il n'est pas nécessaire de connaître l'influence du paramètre sur chacun des critères.
2. Les deux valeurs optimales sont différentes, mais les deux indices de sensibilité sont bien distincts (cas du paramètre 3) : il n'y a alors pas de dilemme et l'on va logiquement arbitrer en faveur de la valeur optimale donnée par l'approche où le paramètre est le plus influent.
3. Les deux valeurs optimales obtenues sont différentes et les valeurs des indices de sensibilité sont proches. Deux sous-cas peuvent alors être distingués.
   (a) Les indices de sensibilité sont très faibles : le paramètre est alors peu influent sur les deux critères et le choix d'une valeur optimale n'aura pas beaucoup d'impact sur le résultat.
   (b) Les indices de sensibilité ne sont pas négligeables : c'est en fait le seul cas où il y a véritablement un dilemme car le paramètre a une influence significative sur les deux critères, et en choisissant une des deux valeurs on favorise une approche en particulier.

5.3.4.2 Résultats pour la version mal isolée

Les résultats de l'optimisation des paramètres de la version mal isolée sont présentés sur la figure 5.19 et leur analyse montre que les deux optimisations posent peu de dilemme.

Par exemple, lorsqu'on regarde les paramètres concernant l'utilisation du rayonnement solaire (taux de surface vitrée, transmission et absorption solaires), on s'aperçoit que deux cas de figure se présentent : soit les valeurs optimales convergent, soit il est facile d'arbitrer en faveur du potentiel exploité car l'influence de ces paramètres sur le besoin est négligeable.

De même, les valeurs optimales des coefficients de convection intérieure et extérieure peuvent être déterminées assez facilement puisque dans les quelques cas où les deux approches ne convergent pas, l'influence de ces paramètres sur le besoin étant négligeable, on choisit de privilégier l'approche par maximisation du potentiel exploité.

Les conclusions sont semblables pour les paramètres de la ventilation même si, dans ce cas, on arbitrera plutôt en faveur de la minimisation du besoin. En effet, le taux de renouvellement d'air et l'efficacité de l'échangeur ont une forte influence sur le besoin alors qu'ils n'impactent pratiquement pas le potentiel exploité.

On constate cependant que l'arbitrage est plus délicat pour la plupart des résistances thermiques. En effet, pour toutes les résistances thermiques sauf pour celle du plafond où les deux approches donnent le même résultat, les valeurs optimales obtenues sont différentes pour les deux approches, mais il est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

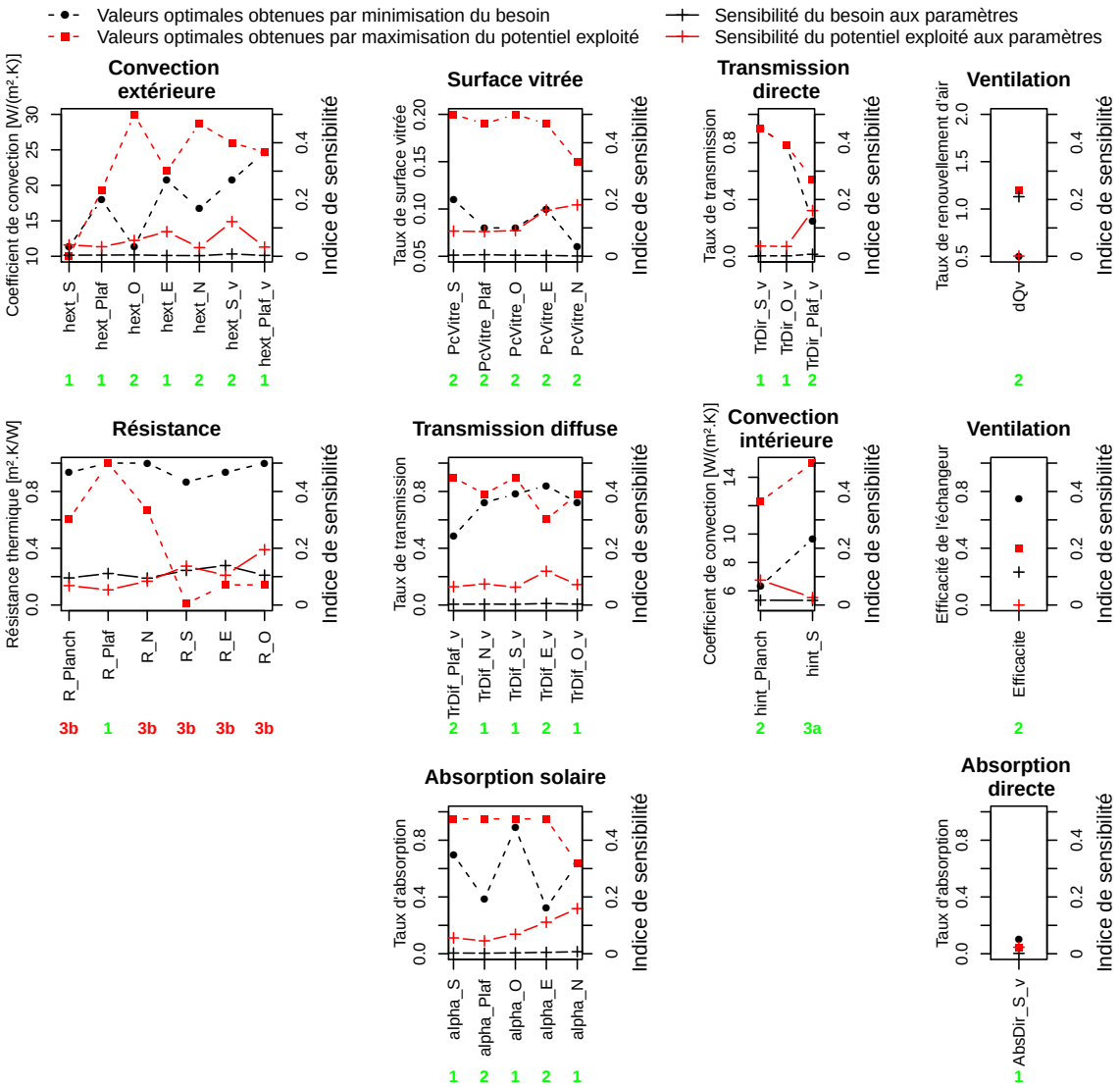

FIGURE 5.19 – Résultats de l'optimisation pour la version mal isolée

difficile d'en choisir une car les sensibilités sont comparables, et non négligeables. On voit donc se dessiner, avec ces derniers résultats, deux voies de conceptions bien distinctes :

- une voie tournée vers l'exploitation du potentiel solaire par les parois vitrées et opaques, sans isolant ou peu, mais qui nécessitera de trouver les moyens technologiques de cette exploitation,
- une voie qui privilégie la réduction des besoins en isolant fortement les parois opaques, et en utilisant les parois vitrées comme capteurs solaires.

La divergence entre ces deux approches peut être illustrée par les valeurs optimales des deux critères. En effet, le besoin minimal obtenu est proche de $30\,\mathrm{kWh/m^2}$ alors que le potentiel exploité maximal obtenu n'atteint qu'environ $9\,\mathrm{kWh/m^2}$. On voit donc qu'il est nécessaire de trouver des solutions permettant, soit de diminuer les besoins, soit d'augmenter l'exploitation du potentiel solaire pour atteindre des ordres de grandeur comparables.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.3.4.3 Résultats pour la version bien isolée

Les résultats de l'optimisation des paramètres de la version bien isolée sont présentés sur la figure 5.20 et il est intéressant de constater que, dans ce cas, un seul vrai dilemme apparaît.

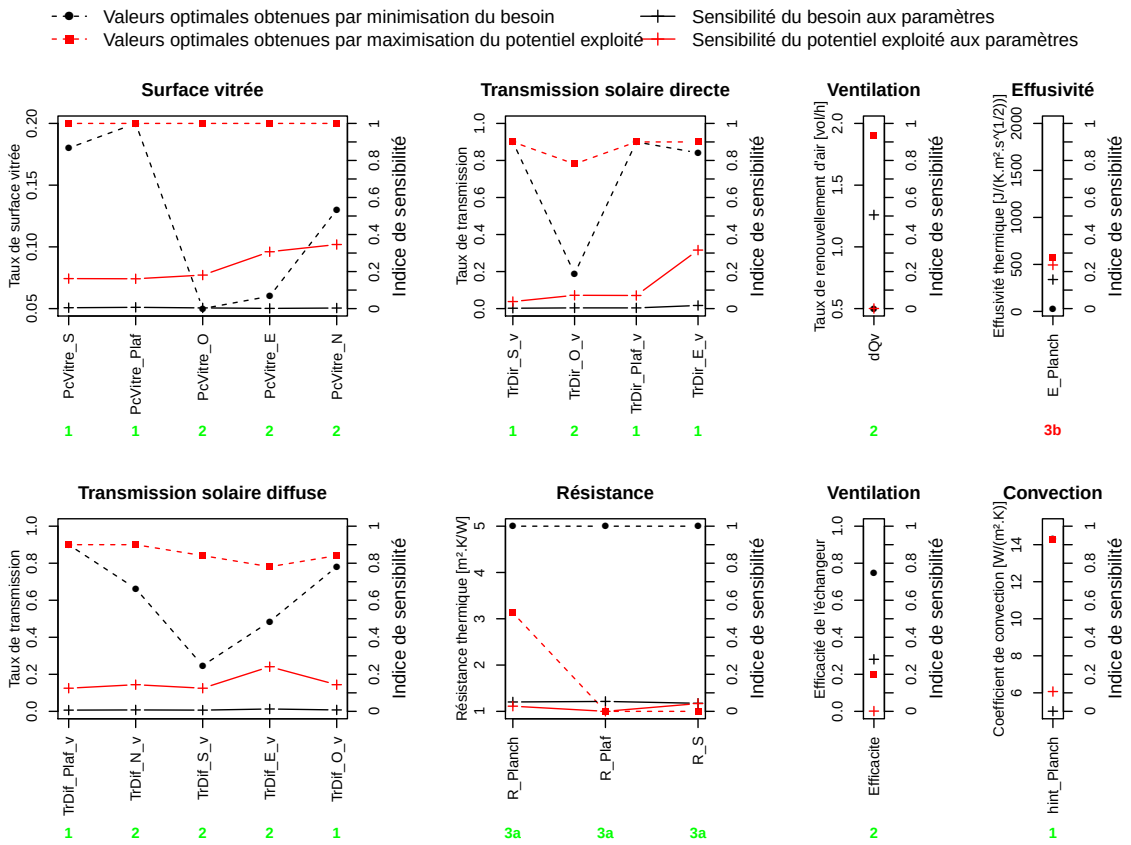

FIGURE 5.20 – Résultats de l'optimisation pour la version bien isolée

Comme dans le cas de la version mal isolée, le choix des valeurs optimales des paramètres concernant la transmission du flux solaire par les vitrages (taux de surface vitrée et taux de transmission directe et diffuse des vitrages) s'effectuera en faveur de la maximisation du potentiel exploité. En effet, dans les cas où les deux optimisations ne convergent pas directement, les paramètres ont une influence beaucoup plus importante sur le potentiel exploité que sur les besoins. Dans quelques cas, on peut noter que les deux approches donnent néanmoins les mêmes résultats optimaux.

De même, on retrouve les conclusions de la version mal isolée en ce qui concerne les paramètres de la ventilation : bien que leurs valeurs optimales soient distinctes dans les deux approches, on arbitrera en faveur du besoin qui est beaucoup plus impacté par ces paramètres que le potentiel exploité.

On remarquera que dans le cas de la version bien isolée, le cas des résistances thermiques pose moins de problème que dans la version mal isolée. En effet, dans ce cas, les résistances thermiques ont beaucoup moins d'influence sur les besoins comme sur le potentiel exploité. On peut donc choisir de privilégier l'une des approches sans pour autant pénaliser l'autre. Ces résultats montrent donc que l'isolation et l'exploitation des ressources peuvent être complémentaires.

Seul le cas de l'effusivité du plancher est délicat. On voit que les valeurs optimales obtenues à l'aide des deux approches ne sont pas égales et que les sensibilités sont trop élevées pour pouvoir négliger ce

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

paramètre. Cependant, on peut tout de même remarquer que les deux optimisations donnent des valeurs optimales relativement basses et que l'influence de l'effusivité sur le potentiel exploité est plus importante que son influence sur les besoins. On aura donc plutôt tendance à arbitrer en faveur du potentiel exploité.

Les valeurs optimales des deux critères confirment que les deux voies d'optimisation peuvent être complémentaires car les besoins minimaux sont de l'ordre de $10\,\mathrm{kWh/m^2}$, et le potentiel exploité maximal de l'ordre de $8\,\mathrm{kWh/m^2}$. On constate encore une fois qu'isoler le bâtiment n'a pas notablement réduit son exploitation du potentiel solaire, mais a permis de diminuer les besoins.

5.3.5 Conclusions de l'optimisation

Dans cette partie on a cherché à optimiser les caractéristiques de l'enveloppe et de la ventilation d'une maison individuelle en fonction de deux critères :

- Le critère classique de minimisation des besoins de chauffage résiduels, utilisé dans l'approche par isolation de l'enveloppe,
- Un critère d'exploitation du potentiel solaire, qui préfigure ce que pourrait être une approche bioclimatique.

Pour cela, on a commencé par simplifier le modèle de bâtiment utilisé afin de se concentrer sur la modélisation de l'enveloppe sans prendre en compte une architecture intérieure complexe. Les paramètres de l'enveloppe ont ensuite été soumis à une analyse de sensibilité qui a permis de tester l'influence de chacun de ces paramètres sur les deux critères. Seuls les paramètres les plus influents ont ainsi été retenus dans la phase d'optimisation. On a constaté que les paramètres considérés comme influents n'étaient pas les mêmes dans les deux approches. Dans l'approche par minimisation des besoins, les paramètres de la ventilation et la résistance thermique des parois opaques sont les paramètres les plus influents, alors que dans l'approche par maximisation du potentiel exploité, ce sont principalement les caractéristiques des surfaces vitrées. On peut donc déjà conclure que les deux approches semblent complémentaires puisqu'elles ne sont pas influencées par les mêmes familles de paramètres.

On a ensuite comparé les résultats de l'optimisation de l'union de ces paramètres sur un mois d'hiver, pour une maison bien isolée et une maison mal isolée, et ce dans les deux approches. Dans les deux cas, les résultats montrent que la maximisation du potentiel exploité peut toujours être réalisée par la sélection de paramètres qui favorisent la transmission du flux solaire à l'intérieur du bâtiment par les parois vitrées. Ce choix n'aura alors que peu d'impact sur le besoin. Le seul point de divergence qu'on a constaté concerne les résistances thermiques, mais uniquement dans la version non isolée. En effet, il faut alors faire un choix entre isoler pour réduire les besoins, et ne pas isoler pour mieux maximiser le potentiel exploité. Cette dernière solution montre qu'une nouvelle voie est possible, mais qu'elle nécessitera le développement de technologies solaires opaques, capables d'atteindre des taux d'exploitation très élevés, pour espérer couvrir des besoins conséquents. L'autre voie, confirmée par l'optimisation sur la maison bien isolée, consiste à isoler les parois opaques tout en maximisant l'exploitation du rayonnement solaire par les fenêtres, ou par des éléments d'enveloppe compatibles avec l'isolation. Dans ce cas, l'isolation et l'approche bioclimatique peuvent tout à fait se compléter.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Conclusion

Une nouvelle méthode dédiée à l'évaluation bioclimatique des bâtiments

Depuis le premier choc pétrolier, de nombreux efforts ont été réalisés en matière de maîtrise des consommations énergétiques des bâtiments. Ces efforts ont notamment conduit à la mise en place d'une méthode de conception essentiellement basée sur la limitation des pertes énergétiques dans les bâtiments. Parallèlement, les bases d'une approche dite « bioclimatique », prenant en compte les apports gratuits de l'environnement pour couvrir le besoin énergétique des bâtiments, ont été posées. Mais, faute de repères simples sur deux points essentiels, l'évaluation de la qualité énergétique de l'environnement et de la qualité bioclimatique d'un bâtiment, cette voie n'a jamais été véritablement développée. En effet, lorsque l'on s'intéresse aux ressources de l'environnement, on constate que leur gisement est traditionnellement évalué indépendamment des besoins énergétiques des bâtiments. De même, les économies d'énergie permises par les technologies bioclimatiques ne sont jamais mises en perspective avec le potentiel environnemental qu'elles sont censées exploitées.

L'objectif principal de cette thèse a donc consisté à proposer une nouvelle méthode, basée sur la simulation numérique, qui permette de quantifier à la fois la qualité énergétique de l'environnement d'un bâtiment en fonction de ses besoins énergétiques, et l'aptitude de ce bâtiment à exploiter les ressources environnementales utiles. Ce double objectif a été atteint grâce à la définition de deux indicateurs principaux : le potentiel concomitant et le potentiel exploité. En associant la qualité d'une ressource à sa concomitance avec le besoin du bâtiment, le potentiel concomitant permet effectivement de quantifier la part utile d'une ressource pour couvrir ce besoin. La part d'une ressource réellement exploitée par un bâtiment est, quant à elle, évaluée en comparant le comportement du bâtiment simulé dans un environnement privé de la ressource et le comportement de ce même bâtiment dans un environnement complet : la différence des besoins énergétiques dans les deux situations nous donne le potentiel de la ressource exploité par le bâtiment.

Des ressources utiles en excédent mais mal exploitées

L'application de cette méthode à trois ressources de l'environnement (le soleil, le ciel et l'air) et à deux besoins du bâtiment (besoin de chauffage et besoin de rafraîchissement) a permis de préciser la définition des indicateurs et de les tester sur un cas d'étude classique : la maison individuelle INCAS. Pour mieux voir l'impact de l'isolation sur les critères bioclimatiques, deux versions de bâtiment ont été modélisées : une version non isolée (typique des constructions datant d'avant la première réglementation thermique de 1974), et une version bien isolée et équipée d'une ventilation double-flux (correspondant aux recommandations du label BBC). Les résultats obtenus peuvent se résumer en deux constats principaux. D'un côté, les ressources annuelles utiles sont largement supérieures aux besoins énergétiques

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

correspondants, et ce pour toutes les ressources et dans toutes les configurations testées. En revanche l'exploitation de ces ressources est très faible et ne dépasse pas 15% de taux d'exploitation dans tous les cas. On peut donc penser que les bâtiments tels qu'ils sont conçus sont bornés dans leur taux d'exploitation des ressources de l'environnement. Ce constat a été confirmé par une analyse dynamique qui a montré que si les périodes de manque de potentiel pouvaient globalement être couvertes en durée par des périodes d'exploitation décalée des ressources (notamment grâce à l'inertie), les puissances restituées étaient largement inférieures aux puissances nécessaires. Autrement dit, le puisage dans les ressources n'est pas assez important pour constituer un stock énergétique assez élevé au début de chaque cycle de déstockage quotidien. En outre, on peut remarquer que le potentiel solaire n'est quasiment pas exploité par les parois opaques, alors que celles-ci représentent la grande majorité des surfaces d'enveloppe. Quand au potentiel du ciel pour le rafraîchissement, pourtant très intéressant car assez important et de plus complémentaire du potentiel de l'air extérieur, il n'est quasiment pas exploité.

La voie bioclimatique : une démarche complémentaire à l'isolation

Les indicateurs ont alors été utilisés comme outils permettant de guider la conception de bâtiments exploitant le rayonnement solaire. Une analyse paramétrique a montré que l'isolation réduit le potentiel solaire utile, mais moins que le besoin de chauffage. Ainsi, la différence entre les deux, appelée « marge bioclimatique », augmente. Cette augmentation est très importante pour les premiers centimètres d'isolation et se tasse au fur et à mesure que l'épaisseur augmente. Sur ce critère aussi, on a alors mis en évidence les limites de l'efficacité de l'isolation. Au delà d'un certain niveau de résistance thermique, de l'ordre de $4\,\mathrm{m}^2{\cdot}\mathrm{K/W}$, isoler n'apporte presque pas d'amélioration.

Les indicateurs ont également permis d'évaluer des solutions d'enveloppe réputées solaires. Cinq technologies « avancées » ont été testées : un mur Trombe ventilé et non ventilé, un composant d'isolation transparente, un mur pariéto-dynamique et une installation solaire combinant capteurs thermiques, ballons de stockage et plancher chauffant. Notre méthode a permis de bien séparer la contribution du soleil des autres effets dans les performances de ces différentes technologies. Il est apparu que l'essentiel des gains énergétiques permis par ces solutions était dû à un effet d'isolation, mais pas tellement à une meilleur exploitation de la ressource solaire. Ainsi, même les meilleures technologies, de ce point de vue, ne permettent pas d'atteindre des taux d'exploitation assurant une couverture totale des besoins. Les technologies qui se sont néanmoins avérées les plus performantes du point de vue de l'exploitation du rayonnement solaire sont celles qui, comme le chauffage solaire ou le mur Trombe ventilé, utilisent un vecteur énergétique pour transporter l'énergie captée vers le volume habitable. Ces résultats montrent que des voies de recherche sont largement ouvertes dans l'exploitation du soleil par les parois opaques.

Enfin, une version simplifiée de la maison individuelle INCAS a été optimisée à travers ses paramètres d'enveloppe et de ventilation en fonction de deux critères : un critère d'optimisation classique en efficacité énergétique du bâtiment qui vise à minimiser les besoins, et un critère de conception bioclimatique qui vise à maximiser l'exploitation du potentiel solaire. Cette double-optimisation a été menée sur deux versions de bâtiments : une version mal isolée, et une version bien isolée. Les résultats de la maison mal isolée ont montré que les deux optimisations donnaient des résistances thermiques optimales différentes dans les deux approches. Comme ces paramètres sont très influents, à la fois sur le besoin et sur le potentiel exploité, il semble donc qu'il existe deux voies de conception bien distinctes. La première est la voie sans isolation, dans laquelle on va chercher à maximiser l'exploitation du potentiel par toute l'enveloppe, y compris par les parois opaques. Cette voie de conception offre alors des perspectives de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

recherche immenses dans la mise au point de composants opaques exploitant le soleil, ce qui rejoint les conclusions tirées de l'analyse des solutions d'enveloppe solaire existantes. Une seconde voie consiste à isoler les parois opaques pour réduire le besoin et tenter alors de le couvrir à l'aide de l'exploitation du soleil par les parois vitrées. En effet, on voit que les caractéristiques radiatives des surfaces vitrées peuvent être optimisées pour mieux exploiter le potentiel solaire sans pénaliser les besoins de chauffage. Cette approche est confirmée par l'optimisation de la maison bien isolée, qui montre que la maximisation du potentiel solaire exploité est tout à fait compatible avec la minimisation des besoin résiduels dans ce cas.

Perspectives

En proposant une méthode d'évaluation non seulement des ressources environnementales utiles à un bâtiment, mais également de la performance des bâtiments au regard de l'exploitation de ces ressources, plusieurs objectifs ont été atteints, et de nombreuses perspectives ont été ouvertes.

Ce travail a tout d'abord permis de déterminer de façon rigoureuse la quantité d'une ressource utile grâce à un critère de concomitance entre ressource et besoin. Le choix de ce critère visait à réduire en théorie le recours au stockage. En pratique, les bâtiments stockent de l'énergie dans leur masse. On pourrait alors améliorer ce critère, et le rendre plus fidèle à la réalité, en s'appuyant sur l'analyse dynamique proposée dans cette thèse qui permet de calculer le retard caractéristique d'exploitation des ressources.

En outre, des pistes de recherche ont été ouvertes dans l'amélioration de l'exploitation des ressources radiatives par l'enveloppe des bâtiments. Il apparaît en effet dans cette étude que les parois opaques, qui constituent la majorité de la surface de la plupart des bâtiments (résidentiels tout du moins), jouent un rôle très important dans l'arbitrage entre réduction des besoins et exploitation du soleil. La thèse a montré que ces parois n'exploitaient pas du tout un gisement solaire largement supérieur aux besoins du bâtiment, mais que leur isolation permettait de réduire les besoins du bâtiment sans pour autant diminuer le gisement. Cette amélioration semble avoir atteint ses limites et une prochaine étape pourrait être de concentrer les efforts de recherche sur l'utilisation du gisement solaire. Pour cela, il semble nécessaire d'effectuer une véritable rupture technologique susceptible de s'appuyer sur la méthodologie décrite dans cette thèse.

On peut également imaginer étendre cette méthode à d'autres ressources (comme la température du sol, le vent...) et d'autres besoins (éclairage, usages spécifiques...) et ainsi développer un véritable outil d'aide à la conception de bâtiments complètement intégrés à leur environnement. Cette méthode repose en effet pour beaucoup sur les notions de présence, de quantité et d'utilité des ressources de l'environnement. Il est impossible de traiter complètement cette question si l'on oublie des ressources et si l'on néglige des besoins. Une ressource inutile, voire néfaste, pour un besoin particulier peut se révéler très utile pour un autre. Il est possible que des ressources laissées de côté dans ce travail se révèlent particulièrement utiles pour couvrir des besoins résiduels de chauffage ou de rafraîchissement qui ne peuvent être complètement couverts par les trois ressources étudiées.

De plus, l'extension souhaitable du domaine couvert par notre démarche pourra utilement s'accompagner d'études complémentaires permettant de mieux quantifier et qualifier les ressources utiles. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes placés dans des cas très favorables de bâtiments isolés sur leur terrain, sans masque proche ou lointain. La réalité du bâtiment est tout autre. L'influence de leur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

environnement sur la ressource disponible et utile peut être prépondérante. Il nous paraît donc utile d'appliquer notre démarche à des cas réels de bâtiments situés dans des environnements plus ou moins denses, plus ou moins végétalisés, plus ou moins abrités... Il paraît notamment important d'étudier les écarts de comportements bioclimatiques liés aux effets du microclimat local, notamment en milieu urbain.

En ce qui concerne l'optimisation, l'évaluation de deux critères, minimisation du besoin résiduel et maximisation de l'exploitation des ressources, a priori bien distincts, a montré que des voies de compromis étaient envisageables. Cependant, nous n'avons optimisé l'enveloppe que sur des paramètres fixes dans le temps et uniquement sur la période hivernale. Il pourrait être intéressant d'étendre cette démarche a des paramètres variables (notamment avec une distinction entre le jour et la nuit) et la tester également en période estivale, à l'aide du critère de minimisation du besoin généré par exemple. Le développement de telles méthodes nécessitera alors des moyens de calculs conséquents qui devront permettre autant de degrés de liberté que de variations temporelles permises pour tous les paramètres.

Toutes ces perspectives montrent que le champ des études visant à étendre le domaine d'application de la démarche bioclimatique est particulièrement étendu. Différents domaines de l'énergétique du bâtiment sont concernés et peuvent contribuer à une meilleure conception des bâtiment, exploitant de mieux en mieux les ressources de l'environnement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Bibliographie

[RT1, a] Arrêté du 10 avril 1974 relatif à l'isolation thermique et au réglage automatique des installations de chauffage dans les bâtiments d'habitation.

[RT1, b] Décret du 24 mars 1982 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments et de leurs équipements.

[RT2, a] Décret numéro 2000-1153 du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments et de leurs équipements.

[RT2, b] Décret numéro 2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions.

[RT2, c] Décret numéro 2010-1269 du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions.

[Sol, 1982] (1982). Guide de la france solaire. Action solaire, numéro hors-série.

[NFE, 1999] (1999). Nf en 410.

[Adelard *et al.*, 1998] ADELARD, L., PIGNOLET-TARDAN, F., MARA, T., LAURET, P., GARDE, F. et BOYER, H. (1998). Sky temperature modelisation and applications in building simulation. *Renewable Energy*, 15(1-4):418 – 430.

[AIE, 2010] AIE (2010). Bilans énergétiques.

[Alcoforado, 2006] ALCOFORADO, M. (2006). Nocturnal urban heat island in lisbon (portugal) : Main features and odelling attempts. *Theoritical Applied Climatology*, 84:1–26.

[Aubinet, 1994] AUBINET, M. (1994). Longwave sky radiation parametrizations. *Solar Energy*, 53(2): 147 – 154.

[Baetens *et al.*, 2010] BAETENS, R., JELLE, B. P. et GUSTAVSEN, A. (2010). Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings : A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2):87 – 105.

[Berdahl et Fromberg, 1982] BERDAHL, P. et FROMBERG, R. (1982). The thermal radiance of clear skies. *Solar Energy*, 29(4):299 – 314.

[Berger *et al.*, 1984] BERGER, X., BURIOT, D. et GARNIER, F. (1984). About the equivalent radiative temperature for clear skies. *Solar Energy*, 32(6):725 – 733.

[Berk *et al.*, 2006] BERK, A., ANDERSON, G. P., ACHARYA, P. K., BERNSTEIN, L. S., MURATOV, L., LEE, J., FOX, M., ADLER-GOLDEN, S. M., CHETWYND, J. H., JR., HOKE, M. L., LOCKWOOD, R. B., GARDNER, J. A., COOLEY, T. W., BOREL, C. C., LEWIS, P. E. et SHETTLE, E. P. (2006). Modtran5 : 2006 update. *In Proc. SPIE 6233, 62331F*.

[Bird, 1984] BIRD, R. E. (1984). A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar Energy*, 32(4):461 – 471.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Bliss, 1961] BLISS, R. W. (1961). Atmospheric radiation near the surface of the ground : A summary for engineers. *Solar Energy*, 5(3):103 – 120.

[Bouyer *et al.*, 2011] BOUYER, J., INARD, C. et MUSY, M. (2011). Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings*, 43(7):1549 – 1559.

[Boyer *et al.*, 1998] BOYER, H., GARDE, F., GATINA, J. et BRAU, J. (1998). A multimodel approach to building thermal simulation for design and research purposes. *Energy and Buildings*, 28(1):71 – 78.

[Bozonnet *et al.*, 2011] BOZONNET, E., DOYA, M. et ALLARD, F. (2011). Cool roofs impact on building thermal response : A french case study. *Energy and Buildings*, 43(11):3006 – 3012.

[BP, 2011] BP (2011). Bp statistical review of world energy.

[Brun *et al.*, 2009] BRUN, A., SPITZ, C. et WURTZ, E. (2009). Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building. *In IBPSA, Glasgow*, pages 1185–1190.

[Burkhardt *et al.*, 2002] BURKHARDT, W., CHRISTMANN, T., FRANKE, S., KRIEGSEIS, W., MEISTER, D., MEYER, B., NIESSNER, W., SCHALCH, D. et SCHARMANN, A. (2002). Tungsten and fluorine co-doping of vo2 films. *Thin Solid Films*, 402(1-2):226 – 231.

[Camous et Watson, 1983] CAMOUS, R. et WATSON, D. (1983). *L'habitat bioclimatique*. L'Etincelle.

[Carbonari *et al.*, 2012] CARBONARI, A., FIORETTI, R., NATICCHIA, B. et PRINCIPI, P. (2012). Experimental estimation of the solar properties of a switchable liquid shading system for glazed facades. *Energy and Buildings*, 45(0):299 – 310.

[Cardonnel, 1983] CARDONNEL, C. (1983). *Solaire actif et passif. Conception, bilan thermique, habitat.* Les éditions parisiennes CFP.

[Castleton *et al.*, 2010] CASTLETON, H., STOVIN, V., BECK, S. et DAVISON, J. (2010). Green roofs ; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10):1582 – 1591.

[Centeno, 1982] CENTENO, M. (1982). New formulae for the equivalent night sky emissivity. *Solar Energy*, 28(6):489 – 498.

[Chahwane, 2011] CHAHWANE, L. (2011). *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.

[Chantrelle *et al.*, 2011] CHANTRELLE, F. P., LAHMIDI, H., KEILHOLZ, W., MANKIBI, M. E. et MICHEL, P. (2011). Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy*, 88(4):1386 – 1394.

[Cheng *et al.*, 2010] CHENG, C., CHEUNG, K. K. et CHU, L. (2010). Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*, 45(8):1779 – 1787.

[Cherruault, 1999] CHERRUAULT, Y. (1999). *Optimisation : méthodes locales et globales*. Mathématiques (Presses Universitaires de France). Presses Universitaires de France.

[Chow *et al.*, 2010] CHOW, T., LI, C. et LIN, Z. (2010). Innovative solar windows for cooling-demand climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2):212 – 220.

[Ciarlet, 1982] CIARLET, P. (1982). *Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation*. Collection Mathématiques appliquées pour la maîtrise. Masson.

[Clus, 2007] CLUS, O. (2007). *Condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (rosée) comme source alternative d'eau douce*. Thèse de doctorat, Université de Corse.

[COMES, 1982] COMES (1982). Projet pour 1000 maisons solaires. Rapport technique, Ministère de l'environnement et du cadre de vie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Daguenet, 1985] DAGUENET, M. (1985). *Les séchoirs solaires : théorie et pratique*. UNESCO, Paris.

[Duforestel *et al.*, 2012] DUFORESTEL, T., BOUIA, H., CHESNÉ, L., COVALET, D., KAEMMERLEN, A., SCHUMANN, M., WÜRTZ, E., BRUN, A., CHAHWANE, L., ROUX, J.-J., RUSAOUEN, G., SKOPECKOVA, M., PEUPORTIER, B., THIERS, S., DUFRASNES, E. et TITTELEIN, P. (2012). Projet habisol-valerie. valorisation par l'enveloppe du bâtiment des ressources énergétiques immédiatement exploitables. rapport final. Rapport technique, EDF R&D, INSA-Lyon, CETHIL, EMP Paris-Tech, LOCIE, OASIIS.

[Edmonds, 1993] EDMONDS, I. R. (1993). Performance of laser cut light deflecting panels in daylighting applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29(1):1 – 26.

[Eliasson et Holmer, 1990] ELIASSON, I. et HOLMER, B. (1990). Urban heat island circulation in gotenborg, sweden. *Theoritical Applied Climatology*, 42:187–196.

[Erell *et al.*, 2004] ERELL, E., ETZION, Y., CARLSTROM, N., SANDBERG, M., MOLINA, J., MAESTRE, I., MALDONADO, E., LEAL, V. et GUTSCHKER, O. (2004). "solvent" : development of a reversible solar-screen glazing system. *Energy and Buildings*, 36(5):467 – 480.

[Escofier et Pagès, 2008] ESCOFIER, B. et PAGÈS, J. (2008). *Analyses factorielles simples et multiples : Objectifs, méthodes et interprétation*. Dunod.

[Etienne, 2009] ETIENNE, S. (2009). *Les verres à couches, 2e partie*. Laboratoire de Physique des Matériaux,, Nancy.

[Etzion et Erell, 2000] ETZION, Y. et ERELL, E. (2000). Controlling the transmission of radiant energy through windows : a novel ventilated reversible glazing system. *Building and Environment*, 35(5):433 – 444.

[Feng *et al.*, 2010] FENG, C., MENG, Q. et ZHANG, Y. (2010). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42(6):959 – 965.

[Feuermann et Novoplansky, 1998] FEUERMANN, D. et NOVOPLANSKY, A. (1998). Reversible low solar heat gain windows for energy savings. *Solar Energy*, 62(3):169 – 175.

[Fioretti *et al.*, 2010] FIORETTI, R., PALLA, A., LANZA, L. et PRINCIPI, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the mediterranean climate. *Building and Environment*, 45(8):1890 – 1904.

[Franca, 1982] FRANCA, J. (1982). Bilan du concours 5000 maisons solaires. *In Conférence Internationale de l'Architecture Solaire, Cannes*.

[Gasparella *et al.*, 2011] GASPARELLA, A., PERNIGOTTO, G., CAPPELLETTI, F., ROMAGNONI, P. et BAGGIO, P. (2011). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43(4):1030 – 1037.

[Givoni, 1994] GIVONI, B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. John Wiley and Sons, Inc.

[Goldberg, 1994] GOLDBERG, D. (1994). *Algorithmes génétiques*. Addison Wesley.

[Granqvist *et al.*, 2010] GRANQVIST, C., GREEN, S., NIKLASSON, G., MLYUKA, N., von KRAEMER, S. et GEOREN, P. (2010). Advances in chromogenic materials and devices. *Thin Solid Films*, 518(11): 3046 – 3053.

[Gueymard, 2001] GUEYMARD, C. A. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71(5):325 – 346.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Gueymard, 2004] GUEYMARD, C. A. (2004). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, 76(4):423 – 453.

[Heschong, 1979] HESCHONG, L. (1979). *Thermal delight in architecture*. MIT Press.

[Jim et Tsang, 2011] JIM, C. et TSANG, S. (2011). Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, 46(6):1263 – 1274.

[Karlessi *et al.*, 2009] KARLESSI, T., SANTAMOURIS, M., APOSTOLAKIS, K., SYNNEFA, A. et LIVADA, I. (2009). Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Solar Energy*, 83(4):538 – 551.

[Kasten et Czeplak, 1980] KASTEN, F. et CZEPLAK, G. (1980). Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 24(2):177 – 189.

[Köhl *et al.*, 2005] KÖHL, M., JORGENSEN, G., BRUNOLD, S., CARLSSON, B., HECK, M. et MÖLLER, K. (2005). Durability of polymeric glazing materials for solar applications. *Solar Energy*, 79(6):618 – 623.

[Klysik et Fortuniak, 1999] KLYSIK, K. et FORTUNIAK, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of lodz, poland. *Atmospheric Environment*, 33:3885–3895.

[Kondratyev, 1969] KONDRATYEV, K. (1969). *Radiation in the Atmosphere*, volume 12 de *International Geophysics Series*. Academic Press.

[Leskovar et Premrov, 2012] LESKOVAR, V. Z. et PREMROV, M. (2012). Influence of glazing size on energy efficiency of timber-frame buildings. *Construction and Building Materials*, 30(0):92 – 99.

[Loncour *et al.*, 2004] LONCOUR, X., DENEYER, A., BLASCO, M., FLAMANT, G. et WOUTERS, P. (2004). Les doubles façades ventilées, classification et illustrations des concepts de façades. Rapport technique, Centre Scientifique et Technique de la Construction.

[Lorenz, 1998] LORENZ, W. (1998). Design guidelines for a glazing with a seasonally dependent solar transmittance. *Solar Energy*, 63(2):79 – 96.

[Lorenz, 2001] LORENZ, W. (2001). A glazing unit for solar control, daylighting and energy conservation. *Solar Energy*, 70(2):109 – 130.

[Martin et Berdahl, 1984] MARTIN, M. et BERDAHL, P. (1984). Characteristics of infrared sky radiation in the united states. *Solar Energy*, 33(3-4):321 – 336.

[Mayer et Kylling, 2005] MAYER, B. et KYLLING, A. (2005). Technical note : The libradtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(7):1855–1877.

[Mazria, 1979] MAZRIA, E. (1979). *The passive solar energy book*. Rodale Press, Inc., Emmaus, PA, USA.

[Montavez *et al.*, 2000] MONTAVEZ, J., RODRIGUEZ, A. et JIMENEZ, J. (2000). A study of the urban heat island of granada. *International Journal of Climatology*, 20:899–911.

[Muselli, 2010] MUSELLI, M. (2010). Passive cooling for air-conditioning energy savings with new radiative low-cost coatings. *Energy and Buildings*, 42(6):945 – 954.

[Niachou *et al.*, 2001] NIACHOU, A., PAPAKONSTANTINOU, K., SANTAMOURIS, M., TSANGRASSOULIS, A. et MIHALAKAKOU, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7):719 – 729.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Nicolas et Vaye, 1978] NICOLAS, F. et VAYE, M. (1978). Pour une approche bioclimatique de l'architecture : rapport final. Rapport technique, Ministère de l'environnement et du cadre de vie. Direction de l'architecture. Comité de la recherche et du développement en architecture.

[Oke, 2002] OKE, T. (2002). *Boundary Layer Climates*. Taylor and Francis.

[Pandey *et al.*, 1995] PANDEY, D. K., III, R. B. L. et PADEN, J. (1995). Effects of atmospheric emissivity on clear sky temperatures. *Atmospheric Environment*, 29(16):2201 – 2204.

[Pereira et Ghisi, 2011] PEREIRA, C. D. et GHISI, E. (2011). The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. *Energy and Buildings*, 43(12):3391 – 3399.

[Perrin de Brichambaut et Vauge, 1982] Perrin de BRICHAMBAUT, C. et VAUGE, C. (1982). *Le Gisement solaire : évaluation de la ressource énergétique*. Technique et Documentation Lavoisier.

[Pfeiffer, 2012] PFEIFFER, A. (2012). Optimization library for interactive multi-criteria optimization tasks. *In 9th International Modelica Conference*.

[Reppel et Edmonds, 1998] REPPEL, J. et EDMONDS, I. (1998). Angle-selective glazing for radiant heat control in buildings : theory. *Solar Energy*, 62(3):245 – 253.

[Rongère *et al.*, 1993] RONGÈRE, F.-X., GAUTIER, B., BONNEAU, D. et COVALET, D. (1993). Clim2000 : Du composant élémentaire au bâtiment tout entier. *In CLIMA2000*.

[Saint-Gobain, 2007] SAINT-GOBAIN (2007). Memento 2007.

[Santamouris, 2001] SANTAMOURIS, M. (2001). *Energy and Climate in th Urban Built Environment*. James and James.

[Santamouris, 2007] SANTAMOURIS, M. (2007). *Advances in Building Energy Research*, volume vol.1, chapitre Chapter 6 : Heat Island Research in Europe : The State of the Art, pages 123–150. Earthscan.

[Santamouris *et al.*, 2010] SANTAMOURIS, M., SFAKIANAKI, A. et PAVLOU, K. (2010). On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings. *Energy and Buildings*, 42(8):1309 – 1313.

[Shen *et al.*, 2011] SHEN, H., TAN, H. et TZEMPELIKOS, A. (2011). The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption - an experimental study. *Energy and Buildings*, 43(2-3):573 – 580.

[Smith *et al.*, 1998] SMITH, G., DLIGATCH, S., SULLIVAN, R. et HUTCHINS, M. (1998). Thin film angular selective glazing. *Solar Energy*, 62(3):229 – 244.

[Sternberg *et al.*, 2011] STERNBERG, T., VILES, H. et CATHERSIDES, A. (2011). Evaluating the role of ivy (hedera helix) in moderating wall surface microclimates and contributing to the bioprotection of historic buildings. *Building and Environment*, 46(2):293 – 297.

[Swinbank, 1964] SWINBANK, W. (1964). Long-wave radiation from clear skies. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 90:488–493.

[Synnefa *et al.*, 2007] SYNNEFA, A., SANTAMOURIS, M. et AKBARI, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11):1167 – 1174.

[Szymanowski, 2005] SZYMANOWSKI, M. (2005). Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of wroclaw, poland. *Theoritical Applied Climatology*, 82:207–224.

[Tang *et al.*, 2004] TANG, R., ETZION, Y. et MEIR, I. (2004). Estimates of clear night sky emissivity in the negev highlands, israel. *Energy Conversion and Management*, 45:1831 – 1843.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Tittelein, 2008] TITTELEIN, P. (2008). *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*. Thèse de doctorat, Université de Savoie.

[Trombe *et al.*, 1976] TROMBE, F., ROBERT, J., CABANAT, M. et SESOLIS, B. (Avril 1976). Concrete walls to collect and hold heat. *In Colloque sur les échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement, AFEDES-INSA, Villeurbanne*.

[Xu *et al.*, 2012] XU, T., SATHAYE, J., AKBARI, H., GARG, V. et TETALI, S. (2012). Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting : Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. *Building and Environment*, 48(0):1 – 6.

[Özkan et Onan, 2011] ÖZKAN, D. B. et ONAN, C. (2011). Optimization of insulation thickness for different glazing areas in buildings for various climatic regions in turkey. *Applied Energy*, 88(4):1331 – 1342.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Annexe A

Tableaux des indicateurs de parois

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

version	meteo	zone	type	orient	surface	potentiel concomitant	potentiel exploité	besoins générés	taux d'exploitation	taux de couverture	taux de génération
bbc	Ma	zone1	F	S	10.32	1112.68	410.23	173.28	30%	132%	65%
				O	3.5	981.87	261.54	139.14	35%	36%	37%
				N	0.88	478.31	124.59	72.27	37%	5%	4%
				E	1	713.04	190.84	97.44	34%	7%	6%
			M	S	12.18	1112.68	584.38	-0.88	0%	-1%	0%
				O	16	981.87	402.32	-1.64	0%	-2%	0%
				N	21.62	478.31	199.34	-2.48	-1%	-4%	-1%
				E	16.25	713.04	290.36	-2.08	-1%	-2%	0%
		zone2	F	S	6.02	1112.68	409.00	172.79	30%	100%	72%
				O	2.25	981.87	254.17	144.31	36%	31%	57%
				N	0.88	478.31	118.03	78.12	40%	7%	9%
				E	1.32	713.04	183.46	102.95	36%	13%	16%
			M	S	16.48	1112.68	581.58	0.21	0%	0%	3%
				O	17.25	981.87	398.98	-0.51	0%	-1%	3%
				N	21.62	478.31	197.37	-1.23	-1%	-3%	1%
				E	18.18	713.04	287.27	-0.86	0%	-2%	3%
	Tr	zone1	F	S	10.32	736.41	344.89	173.97	34%	56%	75%
				O	3.5	675.06	255.44	173.81	40%	19%	50%
				N	0.88	433.60	161.18	122.08	43%	3%	6%
				E	1	585.01	232.68	160.38	41%	5%	7%
			M	S	12.18	736.41	516.64	2.22	0%	1%	-1%
				O	16	675.06	427.32	1.93	0%	1%	-2%
				N	21.62	433.60	282.07	1.20	0%	1%	-4%
				E	16.25	585.01	391.45	1.61	0%	1%	-2%
		zone2	F	S	6.02	736.41	341.94	175.48	34%	39%	80%
				O	2.25	675.06	249.02	178.31	42%	15%	72%
				N	0.88	433.60	155.67	127.11	45%	4%	12%
				E	1.32	585.01	227.22	165.58	42%	8%	18%
			M	S	16.48	736.41	514.18	3.23	1%	2%	3%
				O	17.25	675.06	424.39	2.94	1%	2%	2%
				N	21.62	433.60	280.52	2.26	1%	2%	-1%
				E	18.18	585.01	390.14	2.66	1%	2%	2%
av74	Ma	zone1	F	S	10.32	1112.68	337.05	380.26	53%	25%	44%
				O	3.5	981.87	169.94	321.87	65%	7%	38%
				N	0.88	478.31	60.55	196.10	76%	1%	4%
				E	1	713.04	134.92	262.58	66%	2%	4%
			M	S	12.18	1112.68	682.17	35.15	5%	3%	7%
				O	16	981.87	468.59	23.22	5%	2%	13%
				N	21.62	478.31	248.00	8.65	3%	1%	4%
				E	16.25	713.04	381.21	16.29	4%	2%	6%
		zone2	F	S	6.02	1112.68	346.79	371.38	52%	18%	36%
				O	2.25	981.87	167.97	324.51	66%	6%	36%
				N	0.88	478.31	58.67	198.76	77%	1%	5%
				E	1.32	713.04	133.59	266.45	67%	3%	8%
			M	S	16.48	1112.68	681.42	36.75	5%	5%	16%
				O	17.25	981.87	467.64	24.84	5%	4%	22%
				N	21.62	478.31	247.17	10.27	4%	2%	8%
				E	18.18	713.04	382.11	17.93	4%	3%	11%
	Tr	zone1	F	S	10.32	736.41	276.28	371.72	57%	15%	59%
				O	3.5	675.06	158.77	382.77	71%	5%	49%
				N	0.88	433.60	85.51	280.68	77%	1%	5%
				E	1	585.01	150.96	364.04	71%	1%	6%
			M	S	12.18	736.41	617.14	30.86	5%	1%	7%
				O	16	675.06	515.97	25.57	5%	2%	17%
				N	21.62	433.60	351.28	14.92	4%	1%	4%
				E	16.25	585.01	492.07	22.92	4%	1%	5%
		zone2	F	S	6.02	736.41	279.72	367.11	57%	11%	51%
				O	2.25	675.06	155.52	382.26	71%	4%	47%
				N	0.88	433.60	83.21	282.35	77%	1%	8%
				E	1.32	585.01	148.70	365.77	71%	2%	11%
			M	S	16.48	736.41	614.56	32.27	5%	3%	17%
				O	17.25	675.06	510.80	26.98	5%	2%	29%
				N	21.62	433.60	349.11	16.45	4%	2%	9%
				E	18.18	585.01	490.04	24.43	5%	2%	11%

TABLE A.1 – Indicateurs de potentiel et de performance des parois pour le soleil (valeurs en $\mathrm{kWh{\cdot}m^2}$ de paroi)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

version	meteo	zone	type	orient	surface	potentiel concomitant	potentiel exploité	besoins générés	taux d'exploitation	taux de couverture	taux de génération
bbc	Ma	zone1	F	S	10.32	253.76	114.27	6.03	5%	2%	8%
				O	3.5	261.37	125.73	6.01	5%	1%	3%
				N	0.88	241.43	109.38	6.04	5%	0%	1%
				E	1	250.43	113.99	6.03	5%	0%	1%
			M	S	12.18	313.10	159.78	1.28	1%	1%	2%
				O	16	304.62	163.69	1.29	1%	1%	3%
				N	21.62	263.94	130.45	1.29	1%	1%	4%
				E	16.25	282.37	141.01	1.29	1%	1%	3%
		zone2	F	S	6.02	252.07	58.51	3.18	5%	3%	5%
				O	2.25	260.65	68.06	3.17	4%	1%	2%
				N	0.88	240.71	57.39	3.18	5%	0%	1%
				E	1.32	249.71	59.09	3.18	5%	1%	1%
			M	S	16.48	312.98	84.71	0.74	1%	2%	3%
				O	17.25	304.51	92.48	0.74	1%	2%	3%
				N	21.62	263.82	70.55	0.74	1%	2%	4%
				E	18.18	282.25	75.05	0.74	1%	2%	3%
	Tr	zone1	F	S	10.32	170.46	16.71	0.85	5%	2%	3%
				O	3.5	174.10	18.95	0.85	4%	1%	1%
				N	0.88	164.82	16.26	0.85	5%	0%	0%
				E	1	170.38	16.57	0.85	5%	0%	0%
			M	S	12.18	202.09	23.62	0.25	1%	1%	1%
				O	16	198.26	25.64	0.25	1%	1%	1%
				N	21.62	179.26	20.09	0.25	1%	1%	1%
				E	16.25	190.52	21.07	0.25	1%	1%	1%
		zone2	F	S	6.02	169.24	4.58	0.24	5%	3%	2%
				O	2.25	173.35	5.34	0.24	4%	1%	1%
				N	0.88	164.07	4.57	0.24	5%	0%	0%
				E	1.32	169.63	4.62	0.24	5%	1%	0%
			M	S	16.48	201.97	6.64	0.08	1%	3%	1%
				O	17.25	198.14	7.53	0.08	1%	3%	1%
				N	21.62	179.15	5.83	0.08	1%	4%	1%
				E	18.18	190.40	6.04	0.08	1%	3%	1%
av74	Ma	zone1	F	S	10.32	244.41	36.08	5.64	14%	2%	2%
				O	3.5	247.37	39.78	5.63	12%	1%	1%
				N	0.88	239.55	35.99	5.64	14%	0%	0%
				E	1	243.10	36.28	5.64	13%	0%	0%
			M	S	12.18	320.26	57.55	4.82	8%	2%	2%
				O	16	312.50	66.57	4.83	7%	3%	2%
				N	21.62	275.65	48.36	4.83	9%	4%	3%
				E	16.25	292.48	50.69	4.84	9%	3%	2%
		zone2	F	S	6.02	243.50	32.96	5.04	13%	2%	1%
				O	2.25	246.83	36.59	5.03	12%	1%	0%
				N	0.88	239.02	32.94	5.04	13%	0%	0%
				E	1.32	242.56	33.19	5.04	13%	0%	0%
			M	S	16.48	319.82	53.16	4.38	8%	4%	3%
				O	17.25	312.06	61.96	4.39	7%	5%	3%
				N	21.62	275.21	44.43	4.40	9%	6%	3%
				E	18.18	292.04	46.58	4.40	9%	5%	3%
	Tr	zone1	F	S	10.32	172.43	4.41	0.63	12%	3%	1%
				O	3.5	173.84	4.86	0.62	11%	1%	0%
				N	0.88	170.20	4.45	0.62	12%	0%	0%
				E	1	172.39	4.40	0.63	12%	0%	0%
			M	S	12.18	217.57	6.81	0.56	8%	3%	1%
				O	16	214.03	8.67	0.55	6%	4%	1%
				N	21.62	196.78	6.49	0.56	8%	5%	1%
				E	16.25	206.95	6.31	0.56	8%	4%	1%
		zone2	F	S	6.02	171.88	3.44	0.47	12%	2%	1%
				O	2.25	173.48	3.79	0.47	11%	1%	0%
				N	0.88	169.84	3.47	0.47	12%	0%	0%
				E	1.32	172.03	3.43	0.47	12%	0%	0%
			M	S	16.48	217.28	5.40	0.43	7%	5%	1%
				O	17.25	213.74	6.79	0.43	6%	6%	1%
				N	21.62	196.50	5.08	0.44	8%	7%	2%
				E	18.18	206.66	4.96	0.43	8%	6%	1%

TABLE A.2 – Indicateurs de potentiel et de performance des parois pour le ciel (valeurs en $\mathrm{kWh{\cdot}m^2}$ de paroi)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Annexe B

Tableaux des résultats de l'optimisation

	Valeurs optimales		Indices de sensibilité	
	Besoin	**Potentiel exploité**	**Besoin**	**Potentiel exploité**
dQv	5.00E-01	1.90E+00	5.06E-01	5.87E-04
E_Planch	3.20E+01	5.78E+02	2.46E-02	5.55E-02
Efficacite	7.50E-01	2.01E-01	2.81E-01	1.30E-03
hint_Planch	1.43E+01	1.43E+01	6.82E-04	1.07E-01
PcVitre_E	6.00E-02	2.00E-01	4.71E-03	1.62E-01
PcVitre_N	1.30E-01	2.00E-01	6.81E-03	1.61E-01
PcVitre_O	5.00E-02	2.00E-01	3.72E-03	1.81E-01
PcVitre_Plaf	2.00E-01	2.00E-01	1.15E-03	3.07E-01
PcVitre_S	1.80E-01	2.00E-01	2.95E-03	3.46E-01
R_Plaf	5.00E+00	1.00E+00	5.07E-02	2.79E-02
R_Planch	5.00E+00	3.13E+00	5.36E-02	1.29E-04
R_S	5.00E+00	1.00E+00	4.36E-02	4.21E-02
TrDif_E_v	4.85E-01	7.81E-01	6.62E-03	1.25E-01
TrDif_N_v	6.63E-01	9.00E-01	7.67E-03	1.44E-01
TrDif_O_v	7.81E-01	8.41E-01	6.62E-03	1.25E-01
TrDif_Plaf_v	9.00E-01	9.00E-01	1.28E-02	2.41E-01
TrDif_S_v	2.47E-01	8.41E-01	7.66E-03	1.44E-01
TrDir_E_v	8.41E-01	9.00E-01	2.02E-03	3.80E-02
TrDir_O_v	1.88E-01	7.81E-01	3.82E-03	7.19E-02
TrDir_Plaf_v	9.00E-01	9.00E-01	3.76E-03	7.08E-02
TrDir_S_v	9.00E-01	9.00E-01	1.68E-02	3.16E-01

TABLE B.1 – Valeurs optimales obtenues par minimisation du besoin de chauffage résiduel et par maximisation du potentiel exploité pour la version bien isolée sur le mois de janvier, et indices de sensibilité associés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

	Valeurs optimales		Indices de sensibilité	
	Besoin	**Potentiel exploité**	**Besoin**	**Potentiel exploité**
AbsDir_S_v	1.22E-03	2.29E-02	1.03E-01	4.40E-02
alpha_E	2.46E-03	5.57E-02	3.23E-01	9.50E-01
alpha_N	2.01E-03	4.54E-02	6.37E-01	6.37E-01
alpha_O	3.04E-03	6.88E-02	8.87E-01	9.50E-01
alpha_Plaf	4.92E-03	1.11E-01	3.86E-01	9.50E-01
alpha_S	7.04E-03	1.59E-01	6.99E-01	9.50E-01
dQv	2.10E-01	7.00E-04	5.00E-01	1.20E+00
Efficacite	1.16E-01	1.39E-05	7.50E-01	4.00E-01
hext_E	4.07E-03	4.02E-02	2.07E+01	2.20E+01
hext_N	4.21E-03	3.37E-02	1.67E+01	2.87E+01
hext_O	4.82E-03	5.60E-02	1.13E+01	3.00E+01
hext_Plaf	2.90E-03	8.68E-02	1.80E+01	1.93E+01
hext_Plaf_v	2.28E-03	3.07E-02	2.47E+01	2.47E+01
hext_S	8.10E-03	1.22E-01	1.13E+01	1.00E+01
hext_S_v	3.12E-03	3.25E-02	2.07E+01	2.60E+01
hint_Planch	1.69E-02	8.77E-02	6.33E+00	1.23E+01
hint_S	1.63E-02	2.62E-02	9.67E+00	1.50E+01
PcVitre_E	4.09E-03	8.87E-02	1.00E-01	1.90E-01
PcVitre_N	5.43E-03	8.73E-02	6.00E-02	1.50E-01
PcVitre_O	3.88E-03	9.05E-02	8.00E-02	2.00E-01
PcVitre_Plaf	3.15E-03	1.63E-01	8.00E-02	1.90E-01
PcVitre_S	1.07E-03	1.81E-01	1.10E-01	2.00E-01
R_E	9.56E-02	6.82E-02	9.34E-01	1.42E-01
R_N	1.11E-01	5.34E-02	1.00E+00	6.70E-01
R_O	9.48E-02	8.39E-02	1.00E+00	1.42E-01
R_Plaf	1.22E-01	1.37E-01	1.00E+00	1.00E+00
R_Planch	1.39E-01	1.05E-01	9.34E-01	6.04E-01
R_S	1.05E-01	1.95E-01	8.68E-01	1.00E-02
TrDif_E_v	2.85E-03	6.45E-02	8.41E-01	6.03E-01
TrDif_N_v	3.26E-03	7.38E-02	7.22E-01	7.81E-01
TrDif_O_v	2.79E-03	6.31E-02	7.22E-01	7.81E-01
TrDif_Plaf_v	5.23E-03	1.19E-01	4.85E-01	9.00E-01
TrDif_S_v	3.18E-03	7.20E-02	7.81E-01	9.00E-01
TrDir_O_v	1.59E-03	3.60E-02	7.81E-01	7.81E-01
TrDir_Plaf_v	1.54E-03	3.48E-02	2.47E-01	5.44E-01
TrDir_S_v	7.13E-03	1.61E-01	9.00E-01	9.00E-01

TABLE B.2 – Valeurs optimales obtenues par minimisation du besoin de chauffage résiduel et par maximisation du potentiel exploité pour la version mal isolée sur le mois de janvier, et indices de sensibilité associés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : CHESNÉ
(avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)

DATE de SOUTENANCE : 18/10/2012

Prénoms : Lou

TITRE : Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques.

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre :

Ecole doctorale : MEGA

Spécialité : Énergétique

RESUME :
Les règles et usages actuels de conception des bâtiments sont essentiellement basés sur la minimisation des déperditions thermiques. Pour l'enveloppe du bâtiment cela se traduit par une prédominance de son isolation thermique. Or cette logique, surtout poussée à l'extrême, n'est pas nécessairement la plus pertinente car des ressources énergétiques, qu'elles soient des sources ou des puits de chaleur, existent dans l'environnement, et leur apport mériterait d'être pris en considération. Certaines technologies bioclimatiques, et surtout solaires, existent déjà mais leur utilisation n'est pas du tout généralisée à cause d'un manque de repère sur leurs performances. Pour que la démarche bioclimatique puisse être considérée il est nécessaire de pouvoir évaluer à la fois la « qualité énergétique » de l'environnement, et l'aptitude des bâtiments à exploiter cet environnement.
La méthodologie présentée dans cette thèse est basée sur le calcul d'indicateurs de performance bioclimatique issus de simulations numériques de bâtiments dans diverses conditions climatiques. La simulation permet de supprimer facilement une ressource pour pouvoir obtenir les besoins d'un bâtiment non impacté par la ressource. Ces besoins peuvent alors être comparés à chaque instant au potentiel de la ressource afin de déterminer un potentiel utile, valorisable par le bâtiment. Il est également possible de comparer les besoins du bâtiment dans la simulation sans et avec la ressource et d'en déduire la quantité d'énergie provenant de la ressource réellement utilisée par le bâtiment pour couvrir ses besoins. Un jeu d'indicateurs est ainsi défini pour toutes les ressources et tous les besoins d'un bâtiment, et adapté plus particulièrement aux besoins de confort thermique (chauffage et rafraîchissement) et à trois ressources de l'environnement (le soleil, la voûte céleste et l'air extérieur).
Un cas d'étude est alors choisi pour appliquer cette méthode et les résultats sont analysés à l'échelle du bâtiment tout entier ainsi qu'à l'échelle de chaque paroi. Une première analyse globale, sur toute l'année, permet de fixer des points de repères sur l'état des ressources et l'exploitation qui en est faite par les bâtiments. Dans un second temps, les résultats instantanés sont analysés de manière dynamique, et montrent que ces nouveaux indicateurs permettent de bien caractériser le comportement d'un bâtiment dans son environnement.
Enfin, les indicateurs sont utilisés dans une approche de conception des bâtiments, et plusieurs pistes sont explorées. Une étude paramétrique est tout d'abord menée et permet d'observer l'influence du niveau d'isolation sur les indicateurs de potentiel et de performance. Puis ces indicateurs sont utilisés pour évaluer la performance bioclimatique de solutions d'enveloppe solaires. Dans un troisième temps, une optimisation de l'enveloppe est menée selon deux critères : un critère classique de minimisation du besoin, mais également un critère bioclimatique de maximisation de l'exploitation du potentiel solaire.

MOTS-CLES : Potentiel de l'environnement, Ressources énergétiques, Performance bioclimatique, Enveloppe du bâtiment

Laboratoire (s) de recherche : CETHIL

Directeur de thèse: Jean-Jacques Roux

Président de jury :

J. CARMELIET, Professeur (EMPA, Zurich, Suisse, Examinateur

Composition du jury :

T. DUFORESTEL, Ingénieur Chercheur (EDF R\&D), Examinateur
C. INARD, Professeur (LEPTIAB, La Rochelle), Rapporteur
M. MUSY, Ingénieur de Recherche, HDR (CERMA, Nantes), Rapporteur
J-J. ROUX, Professeur (INSA-Lyon), Directeur de thèse
G. RUSAOUËN, Maître de Conférences (UCBL, Lyon), Examinateur
P. BAIN, Docteur, Responsable de programme (ANR), Invité
J-L. HUBERT, Ingénieur Chercheur (EDF R\&D), Invité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0092/these.pdf
© [L. Chesné], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés