



**HAL**  
open science

# Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique

Zaid Romani

► **To cite this version:**

Zaid Romani. Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique. Génie civil. Université de La Rochelle; Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc), 2015. Français. NNT : 2015LAROS034 . tel-01373443

**HAL Id: tel-01373443**

**<https://theses.hal.science/tel-01373443>**

Submitted on 28 Sep 2016

**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.



*Université Abdelmalek Essaâdi -  
Faculté des Sciences et  
Techniques Tanger - Maroc*

*Université de La  
Rochelle  
France*



**THÈSE de DOCTORAT  
En Cotutelle  
Pour l'obtention du**

**Doctorat National en Sciences et Techniques (Maroc)  
Doctorat de l'Université de La Rochelle (France)**

**Discipline : Génie Civil  
Spécialité : Energétique du Bâtiment**

*Par*

**Romani Zaid**

---

**Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des  
bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique**

---

*Soutenue le 12/12/2015 devant le jury composé de :*

<b>C.INARD</b>	<i>Professeur, Université de La Rochelle, France</i>
<b>J.-J. ROUX</b>	<i>Professeur, INSA de Lyon, France</i>
<b>A.OUBARRA</b>	<i>Professeur, Faculté des Sciences Ain Chok, Casablanca, Maroc</i>
<b>A. EL BOUARDI</b>	<i>Professeur, Faculté des Sciences, Tétouan, Maroc</i>
<b>F. ALLARD</b>	<i>Professeur, Université de La Rochelle, France</i>
<b>A. DRAOUI</b>	<i>Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Tanger, Maroc</i>

<i>Président</i>
<i>Rapporteur</i>
<i>Rapporteur</i>
<i>Examineur</i>
<i>Co-directeur</i>
<i>Co-directeur</i>

## Remerciements

Ce travail est le fruit d'une collaboration ancienne, mais renouvelable entre mes deux co-directeurs de thèse et entre l'université de La Rochelle et la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger de l'université Abdelmalek Essaâdi (Maroc).

Tout d'abord, je tiens à remercier mon co-directeur de thèse Abdeslam Draoui, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, pour sa confiance qu'il m'a accordée et son soutien pour réaliser cette thèse dans un cadre professionnel très favorable. Il a été très disponible pour répondre à tous mes questionnements, pour faire des déplacements dans le cadre de ma thèse, pour analyser et corriger mon travail et pour me donner des conseils pour améliorer mes compétences. Je le remercie aussi de m'avoir fait connaître mon deuxième co-directeur de thèse Francis Allard, Professeur des Universités à La Rochelle.

Un grand merci au professeur Francis Allard d'avoir encadré cette Thèse et de m'avoir permis de passer des séjours scientifiques à l'Université de La Rochelle et d'avoir assuré tous les moyens possibles pour la réussite de ce travail. J'ai beaucoup appris avec lui, son expertise et ses compétences dans le domaine de Génie Civil et plus précisément dans l'énergétique du bâtiment m'ont beaucoup aidé à bien mener ce travail. Il a été très disponible pour répondre à tous mes questionnements, à analyser et corriger mon travail et à m'orienter pour aboutir aux résultats très encourageants de ce travail de recherche.

Je tiens à associer à ces remerciements les membres du jury, Christian Inard, Directeur de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de La Rochelle (France), Jean-Jacques Roux, professeur à l'INSA de Lyon (France), et Abdelaziz Oubarra, professeur à la Faculté des Sciences Ain Chok de Casablanca (Maroc), qui m'ont fait l'honneur d'expertiser ce travail de thèse en tant que rapporteurs, et aussi Abdelmajid El bouardi, professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan (Maroc) d'avoir accepté de juger et d'examiner ce travail.

Je remercie particulièrement Hajar Idder (docteur en génie civil) pour son encouragement, ses conseils et ses relectures de mes manuscrits.

Je tiens aussi à remercier profondément les doctorants Remon Lapisa et Antoine Srun de leurs aides pour la programmation et les relectures de mes manuscrits ainsi que Remy Greffet pour ces aides à la compréhension de certains phénomènes physiques.

Je n'oublie pas tout le personnel du LaSIE, notamment :

- Les doctorants et post-doctorants : Surtout Semhaoui Imane pour la relecture de mes manuscrits, son aide et son soutien, Mohamed Khabbaz pour son soutien et la convivialité, Jana Hamdi pour toutes les discussions ainsi que l'encouragement de tous les autres doctorants.

- L'équipe Tipee : je tiens à remercier toute l'équipe Tipee pour leurs encouragements tout au long de mes séjours à La Rochelle et surtout Cécile Jolas pour les différentes discussions et les données sur le projet du bâtiment PN6.
- Les secrétaires Karine, Jennifer, Isabelle...

Enfin, mes remerciements les plus profonds et les plus intimes s'adressent à ma famille dont je serai reconnaissant toute ma vie pour l'encouragement, le soutien moral et financier, l'amour et le bonheur qu'ils m'ont toujours accordés.

## Résumé

Le bâtiment est considéré comme étant le premier secteur consommateur d'énergie dans le monde. Dans la région méditerranéenne, face à la crise économique et aux engagements pris pour limiter les effets produisant le réchauffement climatique, il est devenu impératif de réduire la consommation énergétique des bâtiments que ce soit par la conception des bâtiments neufs ou par la réhabilitation du parc existant. Dans ce cadre-là, chercher des solutions techniques optimales en tenant compte des critères économiques, environnementaux et sociétaux est un problème très complexe du fait du nombre élevé de paramètres à prendre en compte.

Pour remédier à ce problème, un état de l'art des méthodes d'optimisation multicritère a été réalisé. Nous avons constaté que plusieurs contraintes existent lors de l'utilisation de ces méthodes telles qu'un temps de calcul élevé et la non-maîtrise de la convergence des résultats vers des optimums globaux recherchés.

L'objectif de notre travail est de proposer une nouvelle méthode qui permette de contourner ces difficultés. Cette méthode est basée, dans un premier temps sur le développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de chauffage, de refroidissement, d'énergie finale et du confort thermique d'été à l'aide du logiciel TRNSYS. Pour établir ces modèles, nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences et des simulations thermiques dynamiques. À partir de ces modèles, une analyse de sensibilité a été entamée afin d'identifier les paramètres les plus influents sur les besoins énergétiques et le confort thermique d'été. Une base de données est utilisée associant chaque paramètre à son coût (via le logiciel CYPE) et à son impact environnemental (via la base de données INIES) sur son cycle de vie. Ensuite, une étude paramétrique complète a été réalisée en utilisant les fonctions polynomiales dans le but de déterminer un ensemble de solutions optimales à l'aide de l'approche du Front de Pareto.

Cette nouvelle méthode a été appliquée dans le but de concevoir des bâtiments neufs à haute efficacité énergétique à des coûts maîtrisés pour les six zones climatiques du Maroc. La validation des modèles polynomiaux réalisée grâce à une comparaison avec des simulations aléatoires a donné des résultats très satisfaisants. Avec un modèle polynomial de second degré, l'erreur maximale sur les besoins énergétiques et le confort thermique adaptatif d'été ne dépasse pas 2 kWh/m<sup>2</sup>.an et 9% respectivement dans la plupart des cas. Les modèles développés ont ensuite été utilisés pour l'aide à la décision multicritères. Les résultats obtenus ont montré que des bâtiments à très faibles besoins énergétiques peuvent être construits à un coût raisonnable, et qu'un effort doit être porté sur des solutions plus performantes pour le rafraîchissement en été (surtout à Marrakech et Errachidia).

Enfin, nous avons mis en œuvre la méthode que nous avons développée dans le cadre de la réhabilitation d'un bâtiment existant à La Rochelle. Les critères environnementaux ont aussi été intégrés à la recherche de solutions optimales. La solution retenue selon 14 critères correspond à un ensemble de solutions techniques permettant d'obtenir des besoins de chauffage de l'ordre de 15 kWh/m<sup>2</sup>.an avec un compromis réalisé entre l'efficacité

énergétique, le confort des occupants, les impacts environnementaux et la maîtrise du coût de la réhabilitation.

La méthode développée dans le cadre de ce travail a montré un fort potentiel d'utilisation pour l'aide à la décision multicritère lors de la conception des bâtiments neufs ou en réhabilitation. Elle permet d'effectuer très rapidement une optimisation opérationnelle de l'enveloppe pour contribuer à des bâtiments durables, confortables, à coût maîtrisé et à basse consommation énergétique.

**Mots-clés** : conception énergétique des bâtiments neufs, réhabilitation énergétique des bâtiments existants, les plans d'expériences, outils d'aide à la décision multicritère, analyse de cycle de vie, évaluation des impacts économiques, évaluation des impacts environnementaux.

## Abstract

The building sector is the largest consumer of energy in the world. In Mediterranean region, facing the economic crisis and commitments for climate change, the reduction of energy consumption for both new and existing buildings is more necessary. Against this background, seeking optimal technical solutions taking into account the economic, environmental and societal criteria is a very complex problem due to the high number of parameters to consider.

In order to solve this problem, a state of the art of multi-criteria optimization method has been achieved. We found that many constraints exist when using these methods such as high time calculation and no absolute assurance to find the global optimum. Thus, the main objective of the present work is to propose a new method that allows overcome these difficulties. This method is based on the development of polynomial models for the prediction of heating energy needs, cooling energy needs, final energy needs and summer thermal comfort. To establish these models, we used the design of experiments method and dynamic thermal simulations using TRNSYS software. From these models, a sensitivity analysis has been achieved in order to identify the leading parameters on energy requirements and thermal comfort in summer. A database associating each parameter for its cost and environmental impact on its lifetime was generated from CYPE software and INIES database. Then, a detailed parametric study was performed using polynomial functions for determining a set of optimal solutions using the Pareto front approach.

This new method was applied to design new buildings with high energy efficiency at controlled costs for the six Moroccan climate zones. The validation of polynomial models through a comparison with random simulations gave very satisfactory results. With a polynomial model of the second order, the maximum error on the energy needs and the adaptive thermal comfort did not exceed 2 kWh/m<sup>2</sup>.an and 9% respectively. The developed models were used for multiple-criteria decision analysis. The results showed that buildings with very low energy needs can be built with a reasonable cost. On the other hand an effort should be focused on more efficient solutions for adaptive thermal comfort in summer especially for Marrakech and Errachidia.

Finally, we also implemented our method to a project of energy rehabilitation of an existing building located in La Rochelle (France). Environmental criteria were also taken into account in the optimization process (14 criteria). The selected technical solutions procured approximately 15 kWh/m<sup>2</sup>.year of heating energy needs.

The developed multicriteria decision method showed a great potential for both designing new and existing buildings with high energy efficiency. It allows a very fast operational optimization of sustainable buildings at reasonable cost and low energy consumption.

**Keywords:** building energy design, building refurbishment, building energy efficiency, design of experiments method, multi-criteria decision analysis, life cycle analysis, economic impact, environmental impact.



# Sommaire

<b>Remerciements.....</b>	<b>1</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>11</b>
<b>Chapitre . 1 : Problématiques énergétiques, économiques et environnementales des bâtiments et solutions existantes .....</b>	<b>15</b>
1.1 Introduction .....	16
1.2 Contexte énergétique, économique et environnemental .....	16
1.2.1 A l'échelle internationale .....	16
1.2.2 A l'échelle de la Méditerranée .....	19
1.2.3 Contexte Français .....	21
1.2.4 Contexte Marocain.....	24
1.3 Réglementations thermiques et labels .....	27
1.3.1 Aperçu sur quelques réglementations thermiques dans la région méditerranéenne .....	27
1.3.2 La réglementation thermique en France .....	29
1.3.3 La réglementation thermique au Maroc.....	35
1.3.4 Les labels.....	40
1.4 Paramétrage du bâtiment et des systèmes.....	46
1.4.1 L'emplacement du bâtiment .....	46
1.4.2 L'architecture du bâtiment.....	46
1.4.3 Les éléments de l'enveloppe.....	47
1.4.4 La ventilation.....	51
1.4.5 L'éclairage .....	59
1.5 Conclusion.....	64
<b>Chapitre . 2 : Méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception ou la réhabilitation énergétique des bâtiments .....</b>	<b>66</b>
2.1 Introduction .....	67
2.1 Problématique d'aide à la décision multicritère .....	67
2.2.1 Définition d'un problème d'aide à la décision.....	67
2.2.2 Formulation d'un problème d'aide à la décision .....	67
2.2 Modélisation énergétique et analyse de cycle de vie du bâtiment.....	68

2.3.1	<i>Variables d'étude</i> .....	68
2.3.2	<i>Critères d'aide à la décision</i> .....	70
2.3	Méthodes pour l'aide multicritère à la décision .....	76
2.4.1	<i>Approches par itération de simulations</i> .....	76
2.4.2	<i>Approches par analyse multicritère de la décision (MCDA)</i> .....	77
2.4.3	<i>Approche par l'optimisation multicritère</i> .....	78
2.4.4	<i>Approche hybride</i> .....	88
2.4.5	<i>Discussion</i> .....	88
2.4	Proposition d'une méthode d'aide à la décision multicritère .....	88
2.5.1	<i>Introduction</i> .....	88
2.5.2	<i>Méthode des plans d'expériences</i> .....	89
2.5.3	<i>Modélisation générale du système</i> .....	94
2.5	Exemple d'application et comparaison avec une étude paramétrique complète .....	96
2.6.1	<i>Présentation du cas d'étude</i> .....	96
2.6.2	<i>Etude paramétrique complète</i> .....	97
2.6.3	<i>Application de la méthode des plans d'expériences</i> .....	99
2.6.4	<i>Analyse des résultats et comparaison</i> .....	100
2.6	Conclusion .....	101
 <b>Chapitre . 3 : Application à la conception des bâtiments neufs au Maroc</b>		
<b>102</b>		
3.1	Introduction .....	103
3.2	Données météorologiques.....	103
3.3	Description du bâtiment étudié.....	106
3.3.1	<i>Géométrie</i> .....	106
3.3.2	<i>Découpage en zones du bâtiment</i> .....	107
3.3.3	<i>Données de modélisation et scénario d'usage</i> .....	107
3.5	Définition des niveaux des paramètres d'étude .....	113
3.6	Application de la méthode des plans d'expériences .....	114
3.6.1	<i>Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de chauffage</i> .....	115
3.6.2	<i>Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de refroidissement</i> .....	122
3.6.3	<i>Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins d'énergie finale</i> .....	127

3.6.4	<i>Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction du confort thermique d'été</i> .....	133
3.7	Analyse de sensibilité .....	136
3.7.1	<i>Analyse de sensibilité pour les besoins de chauffage</i> .....	136
3.7.2	<i>Analyse de sensibilité pour les besoins de refroidissement</i> .....	138
3.7.3	<i>Analyse de sensibilité pour les besoins d'énergie finale</i> .....	139
3.7.4	<i>Analyse de sensibilité pour le taux d'inconfort d'été</i> .....	141
3.8	Détermination et analyse des solutions optimales .....	142
3.8.1	<i>Introduction</i> .....	142
3.8.2	<i>Evaluation du compromis entre les besoins d'énergie finale et les impacts économiques</i> .....	145
3.8.3	<i>Evaluation du compromis entre les besoins d'énergie finale et les impacts économiques</i> .....	154
3.9	Conclusion .....	166
<b>Chapitre . 4 : Application à la réhabilitation des bâtiments existants en France           168</b>		
4.1	Introduction .....	169
4.2	Description et diagnostic du bâtiment étudié .....	170
4.2.1	<i>Géométrie</i> .....	170
4.2.2	<i>Données météorologiques</i> .....	170
4.2.3	<i>Le diagnostic de l'enveloppe et des systèmes</i> .....	172
4.3	Modélisation du bâtiment existant.....	175
4.4	Définition des niveaux des paramètres d'étude .....	176
4.5	Application de la méthode des plans d'expériences .....	178
4.5.1	<i>Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de chauffage et du taux d'inconfort d'été</i> .....	178
4.5.2	<i>Analyse de sensibilité des paramètres de conception sur les besoins de chauffage et le taux d'inconfort d'été</i> .....	180
4.6	Détermination et analyse des solutions optimales.....	183
4.6.1	<i>Introduction</i> .....	183
4.6.2	<i>Evaluation du compromis entre l'efficacité énergétique, les impacts économiques et les impacts environnementaux</i> .....	186
4.7	Conclusion .....	189
<b>Annexe 1 : Les exigences limites réglementaire des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments résidentiels au Maroc ..... 195</b>		

<b>Annexe 2 : Matrices d'expériences .....</b>	<b>197</b>
<b>Annexe 3 : Coefficients des modèles polynomiaux.....</b>	<b>207</b>
<b>Référence .....</b>	<b>239</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>252</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>258</b>

## Introduction générale

De nos jours, le réchauffement climatique causé principalement par les émissions de gaz à effet de serre qui ont augmentées d'une manière incontrôlée durant le siècle dernier cause beaucoup de dégâts sur la planète et provoque une réflexion planétaire pour chercher en urgence des solutions à ce problème.

Le bâtiment se positionne comme l'un des secteurs les plus critiques, mais il est aussi parmi les plus favorables pour contribuer efficacement et rapidement à la mise en place de politiques de développement durable à l'échelle planétaire. Le principal défi dans ce secteur est de trouver un compromis entre les critères économiques, environnementaux et sociaux simultanément. Cette situation se présente alors comme un grand défi pour les concepteurs et les décideurs dans les projets de construction ou de réhabilitation des bâtiments.

La croissance économique, démographique et urbanistique dans de nombreux pays non membres de l'OCDE (Organisation de Coopération et du Développement Economique) va transformer le parc immobilier mondial. Dans les pays membres de l'OCDE, en revanche, on prévoit que le secteur de la construction ne va pas trop changer, 75% à 90% du parc immobilier actuel existeront toujours en 2050. Cependant, dans les deux cas, il va falloir contribuer à des bâtiments à haute efficacité énergétique. Deux pays appartenant chacun à ces deux groupes de pays font l'objet de notre travail de recherche, dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments, à savoir la France et le Maroc.

La France a procédé depuis les années soixante-dix à mettre en place des réglementations thermiques pour réduire la consommation énergétique des bâtiments. Pour remédier au problème environnemental, un ensemble de programme et de lois ont vu le jour dans les dix dernières années (Plan climat, lois issues du Grenelle de l'environnement, loi sur la transition énergétique et la croissance verte...).

Le Maroc est considéré comme un pays en développement. La réduction de la consommation énergétique des bâtiments n'était pas prioritaire vu les impacts économiques issus des travaux supplémentaires pour l'amélioration des performances énergétiques dans la phase de construction. Ce n'est que dans l'année 2014 que le décret de mise en place de la première réglementation thermique des constructions a été publié.

Même si le contexte de chacun de ces deux pays est différent, la démarche visant à réduire la consommation énergétique des bâtiments reste similaire. Pour pouvoir réaliser une approche durable sans recours aux énergies fossiles, la conception des bâtiments avec une enveloppe énergétiquement efficace s'avère obligatoire. En effet, plusieurs paramètres doivent être pris en considération dans la modélisation énergétique. Des études paramétriques sont donc nécessaires pour pouvoir identifier les différentes solutions optimales permettant d'atteindre les objectifs visés. Ce type d'étude devient irréalisable en termes de temps de calcul lorsque le nombre de paramètres devient élevé. Il va donc falloir développer des méthodes rapides et efficaces pour remédier à ce problème.

C'est dans ce contexte que notre travail de recherche s'inscrit. Il vise à développer une méthode d'aide à la décision par l'optimisation multicritère pour la contribution à des bâtiments à haute efficacité énergétique tout en minimisant les impacts économiques, environnementaux et sociaux. Dans un premier temps, cette méthode consiste à déterminer à l'aide de la simulation numérique et la méthode des plans d'expériences des modèles polynomiaux pour la prédiction des performances énergétiques et le confort thermique adaptatif en période estivale. Cette étude a pour rôle de réduire le temps de calcul et de réaliser une étude de sensibilité des paramètres permettant d'identifier ceux qui ont un impact significatif sur les critères prédéfinis. Une base de données est ensuite créée pour la réalisation d'une étude paramétrique complète basée sur un processus d'optimisation permettant la détermination des solutions optimales du problème via l'approche du Front de Pareto.

Le présent manuscrit est organisé en quatre chapitres précédés par une introduction générale et suivis par une conclusion générale et des perspectives. Dans le premier chapitre, une introduction de la problématique énergétique, économique et environnementale est présentée à l'échelle internationale et régionale avec en particulier celles du Maroc et de la France. Cette introduction est suivie de la présentation des réglementations thermiques de ces deux pays ainsi que de certains labels européens. Nous présentons ensuite plusieurs solutions pour l'enveloppe d'un bâtiment à haute efficacité énergétique.

Les paramètres de modélisation ainsi que les fonctions objectives qui ciblent en particulier les impacts environnementaux de l'analyse de cycle de vie, des indicateurs financiers, le bien-être des occupants par le confort thermique adaptatif en été sont présentés dans la première partie du chapitre 2. Ce dernier présente aussi une synthèse des approches d'aide à la décision en contexte multicritère trouvées dans la littérature. Ceci nous a permis d'identifier les contraintes des autres méthodes afin de positionner notre démarche d'optimisation multicritère. Les différentes étapes de cette méthode sont ensuite présentées. Enfin, une démonstration est menée pour la validation de cette dernière en comparant les résultats obtenus avec une étude paramétrique complète réalisée par les simulations thermiques dynamiques via le logiciel TRNSYS.

L'application de la méthode proposée dans le chapitre 2 à la conception des bâtiments neufs énergétiquement efficaces au Maroc est réalisée dans le chapitre 3. Dans un premier temps, la présentation d'un bâtiment neuf est effectuée. Ensuite, on procède au développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de chauffage, de refroidissement, d'énergie finale et du confort thermique adaptatif en été. Les modèles sont ensuite validés et utilisés pour la recherche des solutions optimales entre les besoins énergétiques, le confort d'été et les critères économiques sur le cycle de vie du bâtiment correspondant aux six zones climatiques marocaines.

Le dernier chapitre est consacré à l'application de la méthode d'optimisation multicritère que nous avons proposée dans le cadre de la réhabilitation d'un bâtiment de logement social localisé à La Rochelle (France). Des fonctions polynomiales permettant l'estimation des besoins de chauffage et du confort thermique d'été ont été développées. L'analyse de sensibilité et le processus d'optimisation sont ensuite mis en œuvre pour la détermination des

solutions optimales de compromis entre les performances énergétiques de ce bâtiment, le confort thermique adaptatif en été, les critères économiques et environnementaux.



---

## **Chapitre . 1: Problématiques énergétiques, économiques et environnementales des bâtiments et solutions existantes**

---

## **1.1 Introduction**

Après l'exploitation du charbon qui a rendu possible la révolution industrielle au 19<sup>ème</sup> siècle, le rythme de l'augmentation des consommations d'énergie primaire n'a cessé de s'accroître. Cette augmentation a été accompagnée par des impacts négatifs sur l'environnement. A cet effet, des réflexions et des engagements ont été pris à l'échelle internationale par la signature de certains protocoles comme celui de Kyoto en 1997 ou la COP21 organisée à Paris en 2015.

Le secteur du bâtiment est considéré comme étant le mieux placé pour offrir des possibilités de progrès suffisamment fortes pour répondre à ces engagements. Il se positionne comme un élément clé pour faire face aux défis énergétique, économique et environnemental.

Ce chapitre introductif présente donc le contexte général dans lequel s'inscrit le travail de cette thèse. Il est présenté de façon à faire le lien entre les problèmes énergétiques, économiques et environnementaux d'une part et le secteur du bâtiment d'autre part, que ce soit à l'échelle mondiale, régionale (pays de la méditerranée) où se situe les zones climatiques qui font l'objet de notre étude (France et Maroc) et nationale pour les deux pays considérés. Ensuite nous entamons une analyse des solutions proposées par les réglementations thermiques et par les labels. Enfin, un paramétrage des différentes solutions techniques est réalisé.

## **1.2 Contexte énergétique, économique et environnemental**

### **1.2.1 A l'échelle internationale**

L'accès à l'énergie représente un enjeu majeur pour nos sociétés. Selon l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2014), la consommation énergétique mondiale a plus que doublé sur les 40 dernières années passant de près de 6106 Mtep en 1973 à 13 371 Mtep en 2012 (Figure 1-1).

Les énergies fossiles assurent aujourd'hui plus de 80 % de ces consommations. Le pétrole est la première source d'énergie, assurant 31,4 % des besoins mondiaux, suivi par le charbon (29 %) et le gaz (21,3 %). Les énergies renouvelables satisfont quant à elles 13,5 % de la demande. La part du nucléaire dans la consommation d'énergie primaire est de 4,8 %. Ces chiffres montrent la forte dépendance mondiale aux énergies fossiles même si elles sont responsables d'un bouleversement climatique dangereux pour la planète. De plus, l'approvisionnement de ces ressources est soumis à de fortes incertitudes et peut très rapidement se trouver perturbé par des événements d'origine naturelle (l'épuisement du pétrole dans 50 ans !) ou technique (catastrophe industrielle par exemple), mais aussi géopolitique (instabilité politique dans la région de Moyen-Orient par exemple).

Concernant la croissance économique et d'après les statistiques de la banque mondiale (BIRD-IDA, 2015), le PIB (Produit Intérieur Brut) a toujours augmenté ou stagné d'une année sur l'autre depuis 1960, sauf pendant la crise financière en 2009. En cette année, le PIB mondial a chuté de 5,28 % par rapport à l'année précédente. Ce retard a été vite rattrapé en 2010 (Figure 1-2).

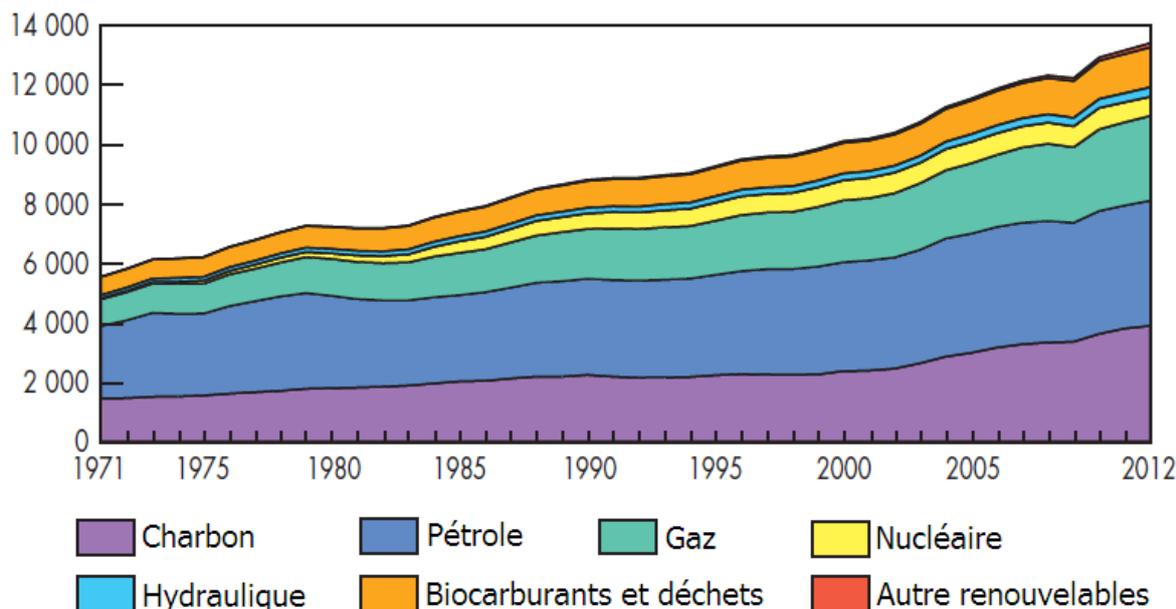


Figure 1-1: Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire en Mtep (IEA, 2014).

Ces croissances ont été accompagnées par les émissions des gaz à effet de serre qui ont aussi plus que doublé passant de 15 633 Mt équivalent CO<sub>2</sub> en 1973 en 31 734 Mt équivalent CO<sub>2</sub> en 2012 (IEA, 2014). Même si à l'horizon 2040, le mix énergétique mondial se divise en quatre parts d'importance presque égales entre le pétrole, le gaz, le charbon et les sources d'énergie renouvelable, ceci ne suffit pas à enrayer l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) liées à l'énergie. Par conséquent la hausse de la température moyenne mondiale pourrait atteindre 6 °C à l'horizon de 2100 (IPCC, 2014 ; IEA, 2012).

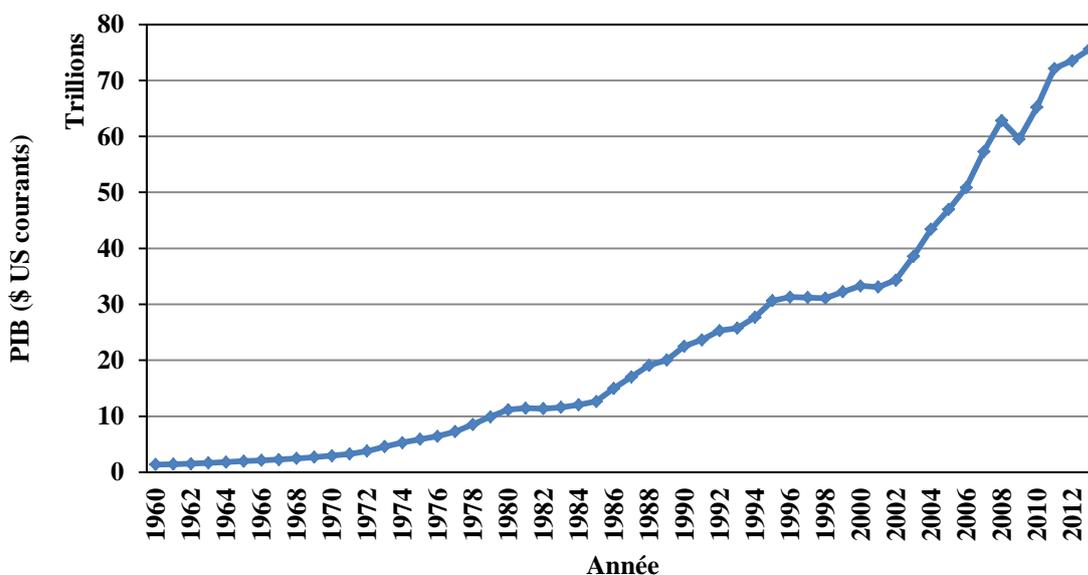


Figure 1-2 : Evolution du PIB mondial en Milliard de Dollars (BIRD-IDA, 2015).

Une telle augmentation de la température à la surface de la terre peut provoquer des phénomènes climatiques très dangereux (inondation, sécheresse, tempête, etc.). Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2014), pour limiter cette hausse à seulement 2°C, le monde ne devrait pas émettre plus de 1000 gigatonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> à compter de 2014. En effet, il est nécessaire en toute urgence de prendre des mesures afin de régler la balance énergétique et environnementale vers la configuration la plus juste et ceci pour chaque secteur économique.

A cet effet, au sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 a été lancé le premier traité international qui vise à limiter les impacts anthropiques dangereux pour le climat. Ensuite, le protocole de Kyoto a été signé en 1997 qui vise à réduire, entre 2008 et 2012, d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990 les émissions de six gaz à effet de serre : dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones (UNFCCC, 2008).

Le bâtiment est le secteur le plus énergivore dans le monde. Il représente à lui seul autour de 35% de la consommation d'énergie finale devant l'industrie et le transport qui consomment respectivement 31% et 30% de la consommation d'énergie finale (Figure 1-3).

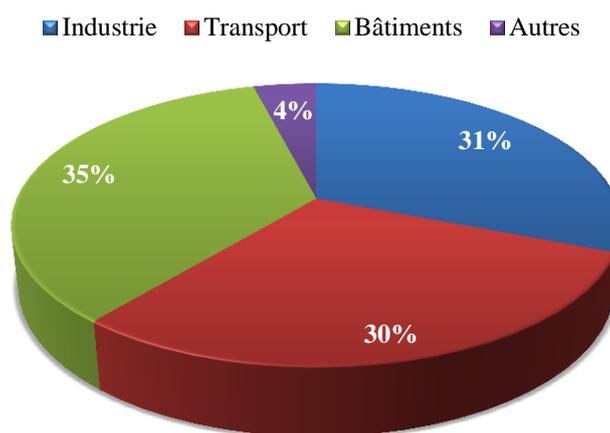


Figure 1-3 : Consommation d'énergie finale par secteur dans le monde en 2010 (IEA, 2012).

Le bâtiment est aussi responsable d'un cinquième des émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Il est classé devant le secteur de transport (14%), le secteur de l'énergie (11%) et le secteur de traitement des déchets (3%). L'industrie reste le secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre (29%) suivi du secteur d'UTCFC (Utilisation des Terres, leurs Changements et la Forêt) qui est responsable de 24% (Figure 1-4).

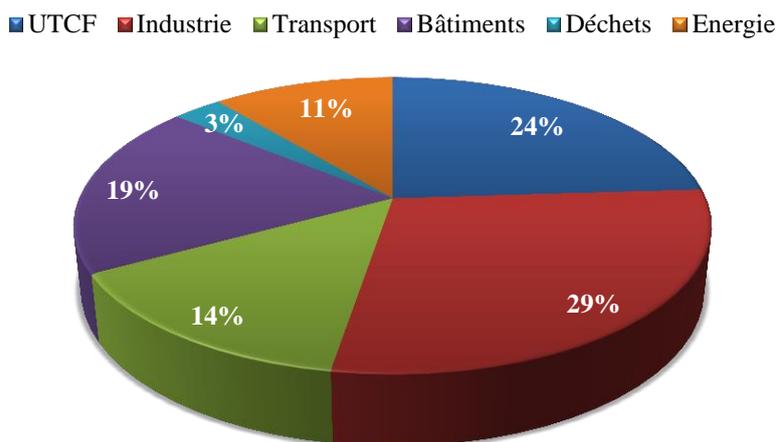


Figure 1-4 : Répartition des émissions mondiales de GES par secteur en 2010 (Edenhofer et al., 2014).

Cependant, le bâtiment est très bien placé pour répondre à tous ces défis : on estime en effet que le potentiel d'économies d'énergie de ce secteur au niveau mondial est de l'ordre de 40% via des mesures performantes et rentables.

Ces enjeux globaux doivent être traités en fonction des conditions de chaque pays ; les choix de politique énergétique diffèrent d'un pays ou d'une région à l'autre. Le mix énergétique sera donc variable, en fonction des divers potentiels et contraintes de chaque pays.

### 1.2.2 A l'échelle de la Méditerranée

Selon les études réalisées par l'Association Plan Bleu pour l'environnement et le développement en Méditerranée (Plan bleu - Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM, 2011), la demande totale d'énergie en Méditerranée a plus que doublé sur la période 1970-2010 (de près de 400 à près de 1000 Mtep) ce qui représente en moyenne 2,7 % de croissance par an. Elle représente environ 8,2 % de la demande mondiale d'énergie. Cette demande est accompagnée par une émission de 2152 MtCO<sub>2</sub> en 2010.

D'autres études ont été réalisées par l'observatoire méditerranéen de l'énergie (OME, 2008) et ont montré que d'après l'analyse de plusieurs scénarios à l'horizon 2030, la demande énergétique dans la Méditerranée croîtrait de plus de 40 % pour dépasser les 1400 Mtep. Cette situation ne pourra qu'amplifier la problématique énergétique et environnementale dans la région dans les années à venir.

Les données socio-économiques ne sont pas les mêmes dans toute la région de la méditerranée. La croissance économique est estimée en moyenne à 3,9 % / an dans les pays du Sud et de l'Est et 1,9 % / an au Nord. Par ailleurs, la croissance démographique est 3 fois plus élevée dans les pays du Sud et de l'Est que dans ceux du Nord (United Nations, 2013). A cet effet, cette région peut être subdivisée en deux sous-zones: Les Pays du Nord de la Méditerranée (PNM : pays de la rive de la méditerranée entre l'Espagne à l'Ouest et Chypre à

l'Est) et les Pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée (PSEM : pays de la rive de la méditerranée entre le Maroc à l'Ouest et la Turquie à l'Est).

La situation dans les PSEM est plus critique dans l'avenir, car elle pourrait représenter en 2030 jusqu'à 43% de la consommation de l'énergie face aux PNM, contre 30 % en 2010 (47 % contre 28 % de l'électricité). L'amélioration du niveau de vie, la baisse du prix des appareils électriques, et le taux élevé des installations industrielles sont les principales causes de l'augmentation de la demande en électricité dans les PSEM.

Même si la problématique des émissions de CO<sub>2</sub> est plus prise en considération par les pays PNM, les PSEM pourraient représenter 46 % en 2025 de ces émissions du bassin contre 11 % en 1971 selon le scénario proposé par le Plan bleu (Plan bleu - Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM, 2011) (Figure 1-5). Cependant, les défis énergétiques et environnementaux doivent être mis en valeur pour les deux sous-zones de la méditerranée avec des adaptations aux contextes de chaque secteur économique de chaque pays.

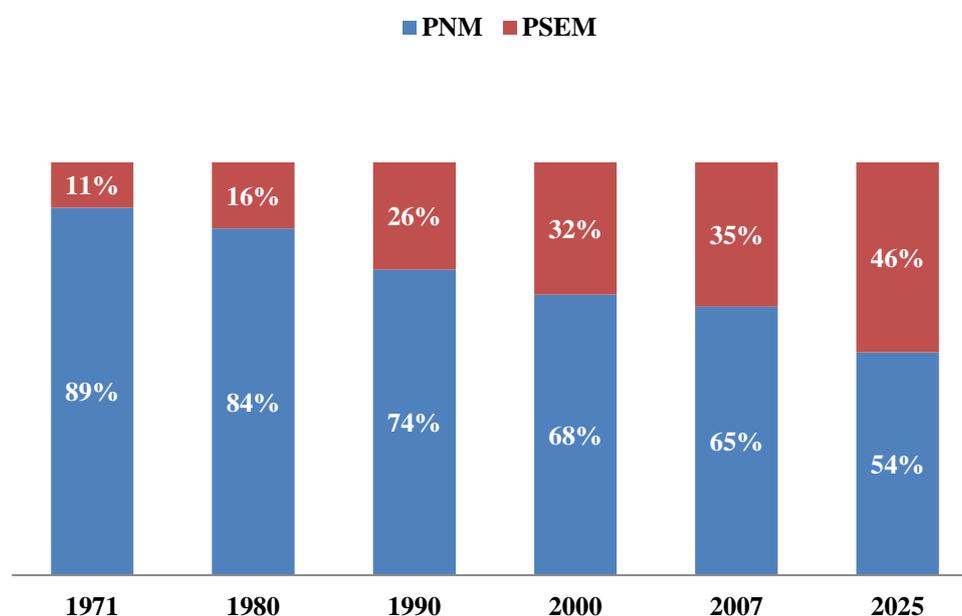


Figure 1-5 : Emissions de CO<sub>2</sub> en MT dans les PNM et PSEM entre 1971 et 2025 (El Andaloussi, 2010).

Dans la région méditerranéenne, le bâtiment est responsable de plus d'un tiers de la consommation d'énergie finale. En outre, il pourrait permettre jusqu'à 60 % d'économies d'énergie, il est donc particulièrement bien placé pour répondre aux enjeux énergétique et environnemental en Méditerranée.

Face à la demande de logements, les politiques publiques des PNM favorisent plutôt la réhabilitation de l'existant, tandis que les PSEM mettent en œuvre de vastes programmes et des cadres réglementaires pour la construction de bâtiments neufs.

### 1.2.3 Contexte Français

#### 1.2.3.1 L'énergie en France

Même si en 2013 la production d'énergie primaire en France a atteint un record national à près de 139 Mtep, soit 2 Mtep de plus que l'année précédente (grâce à la bonne tenue des énergies renouvelables), elle est toujours insuffisante pour couvrir l'ensemble des besoins avec une dépendance énergétique de l'ordre de 46,9% (SOeS, 2015).

Selon une analyse sectorielle réalisée par le Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS, 2015), au cours de la période 1973-2013, la consommation finale d'énergie dans l'industrie (y compris la sidérurgie) a fortement diminué d'environ 15,2 %. Alors que dans le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire), il y a une légère augmentation, en passant de 42,1 % à près de 44,8 %, et une très légère augmentation de 0,3% dans le domaine de l'agriculture. Tandis que le secteur des transports connaît une augmentation d'environ 12,2 %. La Figure 1-6 montre l'évolution de la consommation d'énergie finale en France dans les différents secteurs économiques pendant cette période 1973-2013.

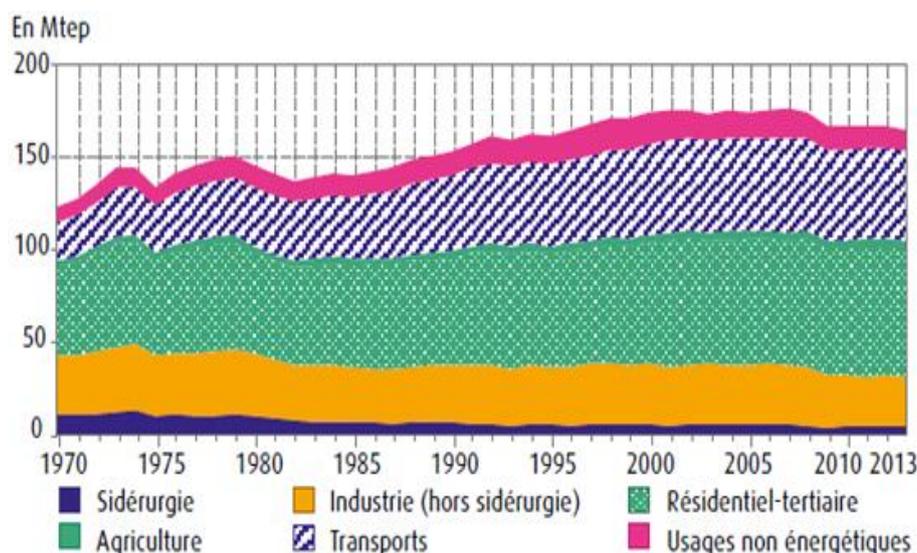


Figure 1-6 : Consommation d'énergie finale par secteur en France (SOeS, 2015).

La Figure 1-7 montre la répartition des émissions du CO<sub>2</sub> dans les différents secteurs économiques en France selon les études du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA, 2014). Le secteur du bâtiment représente à lui seul presque le quart des émissions.

Nous pouvons conclure de ces quelques chiffres que le bâtiment est un secteur très sensible en France. En 2012, le secteur résidentiel comportait 33,4 millions de logements, dont 56,1 % de maisons individuelles et 43,9 % de logements collectifs. 55% de ces bâtiments ont été construits avant 1975. La répartition moyenne de leur consommation d'énergie par usage est 61,3 % pour le chauffage, 12,1 % pour l'eau chaude sanitaire, 7 % pour la cuisson et 19,5 % pour les usages spécifiques. Le chauffage et l'eau chaude sanitaire sont ainsi responsables des 3 quarts de la consommation de l'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> (CEREN, 2014).



Figure 1-7 : Émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, par secteur, en France métropolitaine (CITEPA, 2014).

### 1.2.3.2 Chiffres clés sur la réhabilitation du Parc

Dans les pays de l'hémisphère nord y compris la France, environ 75% à 90% du parc immobilier actuel sera toujours présent en 2050. Actuellement, le taux de rénovation des bâtiments résidentiels dans lesquels il y a une possibilité d'améliorer considérablement l'efficacité énergétique de l'enveloppe est estimée à moins de 1% par an (BPIE, 2011). Ainsi, une action immédiate est nécessaire sur la rénovation des bâtiments anciens pour améliorer significativement les performances énergétiques globales du Parc.

En outre, la crise économique de 2009 a influencé négativement les rénovations réalisées dans le secteur du bâtiment. Pour montrer le niveau d'aboutissement de ces travaux, une étude a été réalisée par l'Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement (OPEN, 2014), et trois niveaux ont été définis:

- Niveau « une étoile » : Aucune isolation et/ou niveau minimal de performance du système de chauffage.
- Niveau « deux étoiles »: parois opaques isolées (toiture, façade, intérieur), ou ouvertures rénovées et/ou un nouveau système de chauffage.
- Niveau « Trois étoiles » : parois opaques isolées (toiture, façade, intérieur), ouvertures rénovées et nouveau système de chauffage à haute performance.

Il a été constaté que le niveau de rénovation trois étoiles ne représente que 5% des réalisations. La rénovation deux étoiles est la plus fréquente avec un taux de 71,2%, alors que la rénovation une étoile représente 23,9%. Il semble donc que dans ce contexte de crise, les ménages limitent leurs dépenses en choisissant des solutions moins performantes pour la rénovation de leurs logements. Ceci amène à dire qu'il est nécessaire d'accompagner la procédure de réhabilitation en recherchant une optimisation technico-économique convaincante pour les acteurs.

### 1.2.3.3 Politique énergétique et environnementale en France

Parallèlement aux problèmes énergétique et environnemental intrinsèques du pays et le lancement d'un débat national sur la transition énergétique, la France s'est aussi engagée à d'autres défis à l'échelle européenne et internationale.

Outre les engagements pris par la France dans le cadre du protocole de Kyoto, il va falloir diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon de 2050. Pour cette raison une stratégie nationale de développement durable a été présentée en juin 2003. Suite à cette stratégie plusieurs plans et lois ont alors été mis en action :

- **Le Plan climat** présenté en 2004 et actualisé en 2013 : Ce plan vise essentiellement à donner des mesures permettant de réduire 54 millions tonnes équivalent CO<sub>2</sub> par an en 2010 et aussi de définir des stratégies de recherche technologique dans le but de contribuer à l'engagement du protocole de Kyoto. Concernant le secteur du bâtiment, l'amélioration de 15% de la performance énergétique globale dès 2005 avec un objectif d'amélioration de 40% d'ici 2020. Cet objectif sera atteint en renforçant, au fur et à mesure, les exigences de la réglementation thermique (ADEME, 2009).
- **La loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique** a été présentée en 2005. Elle contient au total 110 articles qui portent sur les limites prédéfinies pour une meilleure économie et approvisionnement de l'énergie au niveau national tout en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre (Legifrance, 2005).
- **La directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB)** qui s'applique aux Etats membres sont obligés de mettre en œuvre six principaux éléments (DPEB, 2010) :
  - ✓ Développement d'une méthodologie commune de calcul de la performance énergétique des bâtiments qui pourra être complétée par un indicateur d'émission de CO<sub>2</sub>;
  - ✓ Des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments neufs et des bâtiments existants lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovations importants;
  - ✓ Des études de faisabilité technique, environnementale et économique pour les bâtiments neufs de taille supérieure à 1000 m<sup>2</sup>, portant sur des systèmes alternatifs d'approvisionnement en énergie;
  - ✓ La mise en place des systèmes de certification pour les bâtiments neufs et existants et, dans les bâtiments publics toute en affichant les certificats et d'autres recommandations;
  - ✓ La mise en œuvre d'un contrôle régulier des chaudières à combustibles de 20 à 100 kW et des systèmes centraux de climatisation de plus de 12 kW dans les bâtiments ainsi que le diagnostic des installations de chauffage de plus de 20 kW lorsqu'elles comportent des chaudières de plus de 15 ans.
- **Les lois issues du Grenelle de l'environnement** visant à prendre des décisions pour mieux approfondir les engagements vis-à-vis de l'environnement et de développement durable par la proposition des solutions concrètes qui permettent de favoriser l'innovation dans le secteur du bâtiment (Legifrance, 2009b). Les détails et les exigences de la réglementation thermique issue de cette loi sont présentés dans la suite de ce chapitre.

- **La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte** adoptée le 17 août 2015 qui définit plusieurs lignes directrices pour le développement durable dont deux objectifs principaux concernent le secteur du bâtiment :
  - ✓ Toutes les nouvelles constructions sous maîtrise d’ouvrage de l’État, de ses établissements publics ou des collectivités territoriales devraient faire preuve d’exemplarité énergétique et environnementale et sont, chaque fois que possible, à énergie positive et à haute performance environnementale. Ceci permettra la contribution à des bâtiments à énergie positive d’ici 2020 ;
  - ✓ La mise en place d’un projet pour la réhabilitation de 3% de bâtiment existant par an en France.

#### 1.2.4 Contexte Marocain

Depuis l’année 2000, l’économie marocaine a connu un taux de croissance de 180%, soit 12,85 % par an mesuré par le PIB (\$ US courant) (BIRD-IDA, 2015) alors que la population n’a augmenté que de 15% sur cette période (Figure 1-8).

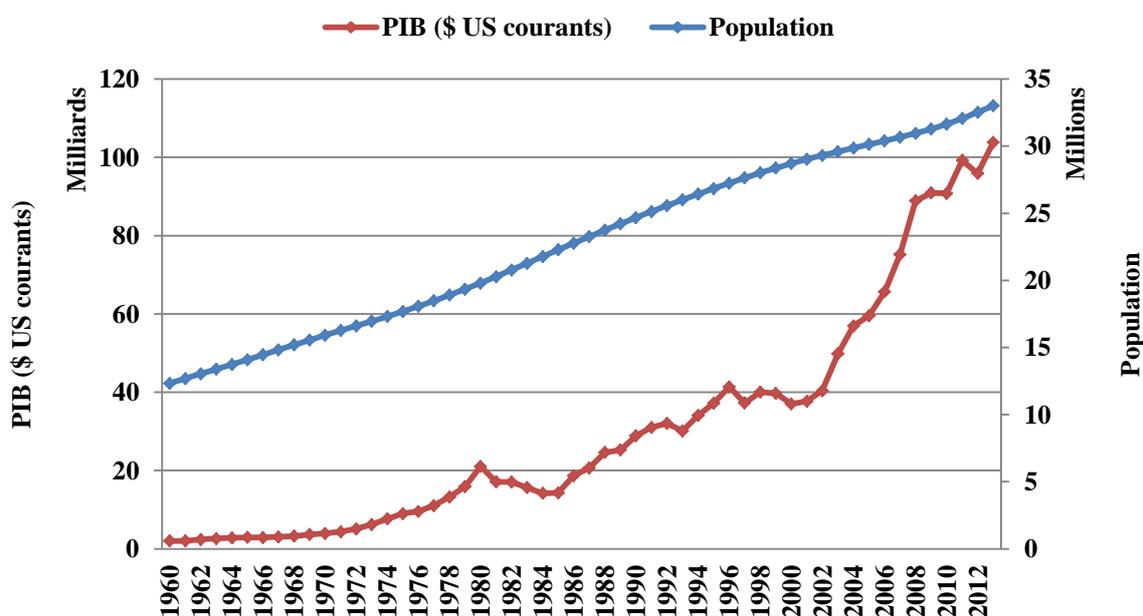


Figure 1-8 : Evolution de la population et de PIB au Maroc entre 1960 et 2013.

Cette situation exceptionnelle a conduit à une progression conséquente de la consommation énergétique, soit près de 53% entre 2004 et 2012 sachant que la situation du pays est très critique, car il importe à l’heure actuelle environ 94% de ces besoins d’énergie. En effet, la facture énergétique devient très lourde pour la balance économique et continue à croître d’une manière très importante après la crise mondiale de 2009 (Figure 1-9).

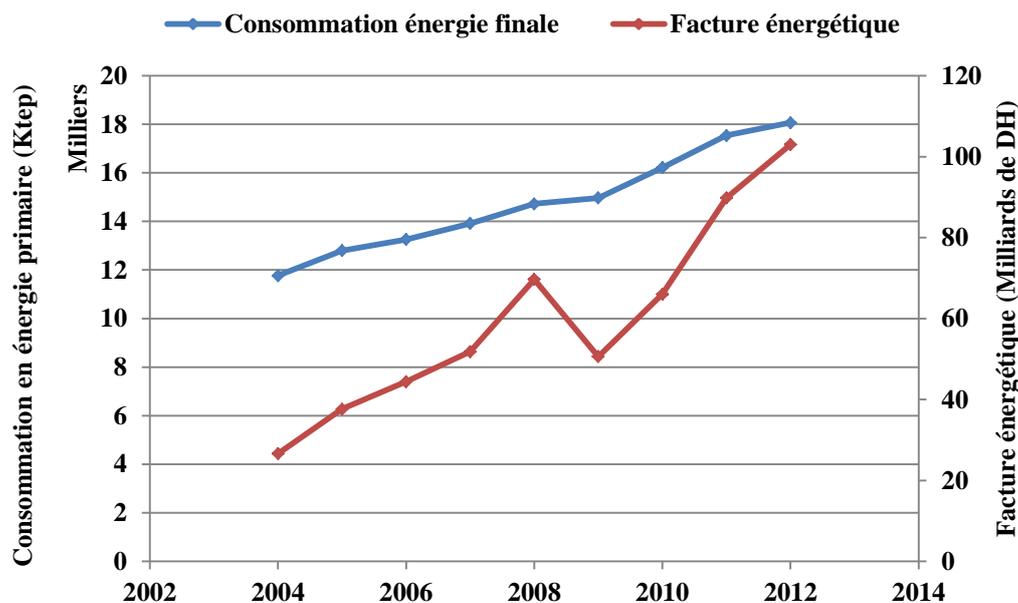


Figure 1-9 : Evolution de la consommation énergétique primaire et de la facture énergétique au Maroc entre 2004 et 2012 (11 Dirhams  $\approx$  1€).

La transition énergétique au Maroc a bel et bien commencé. Mais, même si les énergies renouvelables sont très prometteuses, elles sont encore très loin d'être suffisantes sachant que leurs production ne dépasse pas 3,5% de la consommation en 2012. La consommation des énergies fossiles est encore largement dominante et représente environ 89,4% de la consommation énergétique totale (MEM, 2012).

Le Maroc est considéré comme un pays en développement avec une croissance urbanistique et un développement rural importants. Cette situation induit une consommation d'électricité en forte croissance. Le taux d'accès à l'électricité par la population est passé de 49,2% en 1990 à 98,9% en 2010 grâce à l'application du Plan d'Electrification Rurale Généralisée (PERG). En effet, la consommation énergétique des ménages est passée de 0,21 à 0,30 tep (Jaouhari et al., 2013).

Même si le Maroc est placé parmi les pays les moins émetteurs de gaz à effet de serre au niveau mondial, avec une émission d'environ 1,6 ktCO<sub>2</sub> par habitant, cette dernière ne cesse pas d'augmenter avec une croissance quadratique (Figure 1-10).

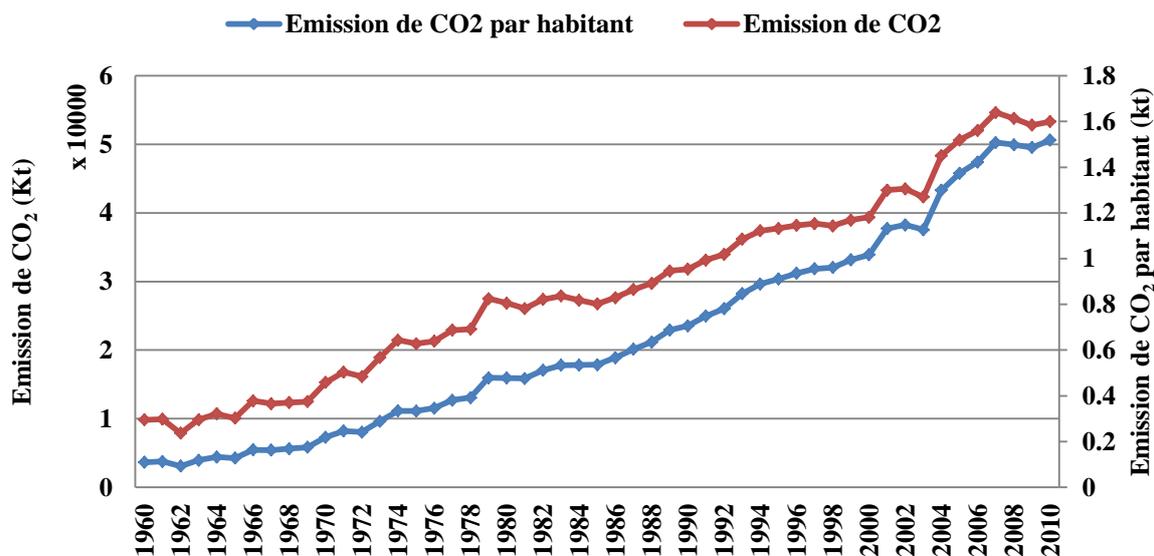


Figure 1-10 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre entre 1960 et 2010 au Maroc (BIRD-IDA, 2015).

En vue de cette dynamique croissante du pays, le Maroc a décidé, parallèlement au renforcement de l'offre, d'agir sur la demande en énergie. A cet effet, l'efficacité énergétique est devenue un élément essentiel pour l'accompagnement d'une nouvelle stratégie énergétique au niveau national. Cette stratégie fixe comme objectif de réaliser une économie de 12% d'énergie fossile à l'horizon 2020 et 15% d'ici 2030 et l'utilisation des énergies renouvelables pour satisfaire environ 42% de besoin en énergie (14% de solaire, 14% d'éolienne et 14% d'hydraulique).

Selon les statistiques publiées par l'Agence de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (ADEREE), en 2010, la consommation du secteur du transport est la plus élevée avec une part de 44%, suivie du secteur du bâtiment qui est responsable d'un quart de la consommation (25%) dont 18% réservée au résidentiel et le reste pour le tertiaire. Alors que pour l'industrie et l'agriculture cette valeur vaut respectivement 21% et 13% (ADEREE, 2014c).

Les enjeux du secteur du bâtiment peuvent encore aggraver la situation énergétique et environnementale dans le pays. La consommation dans ce secteur est appelée à augmenter rapidement dans les années futures pour les raisons suivantes :

- L'augmentation de la population et donc de la demande de logement ;
- L'augmentation sensible du taux d'équipement des ménages en appareils électroménagers du fait de l'amélioration du niveau de vie et de la baisse des prix des équipements (chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, réfrigération, etc.) ;
- L'évolution importante du parc de bâtiments en raison des grands programmes nationaux: la construction des villes nouvelles (Chrafate, Tamesna....), programme des 150 000 logements par an, plan Azur de l'hôtellerie, programme d'urgence de l'éducation nationale, programme de réhabilitation des hôpitaux....

Vu le prix élevé de l'énergie au Maroc, la majorité des marocains utilisaient les vêtements et les couvertures pour se protéger du froid en hiver et ouvrait les fenêtres pour le rafraîchissement d'air en été (ventilation naturelle). L'efficacité énergétique et le confort thermique à l'intérieur des bâtiments n'étaient pas réellement des critères primordiaux lors de la conception des bâtiments dans ce pays ce qui a conduit à un parc existant très énergivore. Cependant, l'inconfort dû à l'absence de système de conditionnement (chauffage, ventilation et climatisation) a causé par le passé des problèmes sanitaires pouvant conduire à des maladies et même parfois à des décès (Le Figaro, 2012 ; GSCF, 2015).

De nos jours, les Marocains deviennent de plus en plus exigeants vis-à-vis des conditions de confort, et le marché de vente des systèmes de chauffage et de climatisation est en forte croissance. Le taux d'équipement en chauffage des logements a plus que doublé en dix ans, passant de 1,9 à 4,9 %. La consommation énergétique du chauffage, même si elle demeure faible, a presque doublé, passant de 26 à 50 tep (Jaouhari et al., 2013) sur la même période. Le marché de la climatisation connaît également une évolution spectaculaire avec un passage de moins de 10000 unités installées en 2000 à plus de 220 000 en 2010. Ainsi, la consommation d'électricité due à la climatisation a connu une augmentation très sensible (ADEREE, 2011).

Entre 2000 et 2010, le taux d'équipement en chauffe-eau des logements a aussi plus que doublé. Le taux d'équipement en chauffe-eau à gaz est passé de 11 à 26 %. Celui des chauffe-eau solaire a été multiplié par 8 passant de 0,25 à près de 2 %. Cependant, la consommation énergétique liée à la production d'eau chaude sanitaire est passée de près de 30 à 40 ktep sur cette période (Jaouhari et al., 2013).

Nous pouvons alors conclure que l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments constitue l'une des principales mesures structurelles d'efficacité énergétique au Maroc. A cet effet, il va falloir mettre en place de bonnes pratiques, telles que l'amélioration des performances des enveloppes des bâtiments et l'utilisation des énergies renouvelables pour réduire significativement l'augmentation de la facture énergétique.

### **1.3 Réglementations thermiques et labels**

#### **1.3.1 Aperçu sur quelques réglementations thermiques dans la région méditerranéenne**

Afin de résoudre les défis liés aux enjeux énergétiques, économiques et environnementaux dans le secteur du bâtiment (partie 1.2), plusieurs lois et réglementations sont mises à disposition par les pays de la méditerranée. Nous présentons dans ce qui suit quelques réglementations thermiques des bâtiments de certains pays de cette région.

Il est à noter que pour les pays du nord de la méditerranée (Euro-méditerranéens), la communauté européenne s'est défini certaines règles à suivre pour la mise en œuvre de la réglementation thermique des bâtiments en Europe (DPEB, 2010).

##### **1.3.1.1 La réglementation thermique en Espagne**

En Espagne, l'application de la DPEB en rapport avec les exigences de performance énergétique du bâtiment se base sur le Code technique de la Construction (Código Técnico de la Edificación (CTE) - Ahorro de Energía) (CTE, 2013). La réglementation concerne tous les

bâtiments neufs ainsi que les bâtiments de plus de 1000 m<sup>2</sup> pour lesquels est effectuée une réhabilitation de plus de 25% de la surface. Deux méthodes sont proposées :

- Une méthode simplifiée basée sur le contrôle indirect des besoins énergétiques à travers la limitation des paramètres de l'enveloppe tel que les coefficients de transmission des parois en contact avec l'extérieur et le facteur solaire des vitrages en fonction de la zone climatique étudiée. Le coefficient de transmission thermique des vitrages varie entre 1,9 et 5,7 W/m<sup>2</sup>.K et le facteur solaire des fenêtres varie de 0,29 et 0,6 en fonction de l'orientation, de la charge thermique interne (faible ou élevée), la surface des fenêtres et de la zone climatique (CTE, 2013). La réglementation impose aussi que l'humidité relative moyenne mensuelle ne dépasse pas 80%. Les bâtiments doivent être équipés de systèmes d'éclairage et de production énergétique en adéquation avec les besoins des usagers en utilisant des systèmes de contrôles ajustés en fonction des scénarios d'occupation. De plus, l'utilisation de sources d'énergies renouvelables est devenue obligatoire pour produire de l'eau chaude sanitaire (pour les bâtiments résidentiels et tertiaires), ou pour produire de l'énergie électrique dans les bâtiments tertiaires.
- La deuxième méthode, dite générale, s'appuie sur l'évaluation des besoins énergétiques à travers une comparaison avec un bâtiment de référence. La modélisation se fait via le logiciel LIDER (gratuit). Les températures de consignes pour l'hiver et l'été sont respectivement 21 et 26°C.

### 1.3.1.2 La réglementation thermique des bâtiments en Italie

Dans le cadre national italien, la DPEB a été introduit dans plusieurs actes juridiques (législatifs, décrets ministériels et présidentiels) par le ministère du Développement économique et l'Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable (ENEA). Cette agence a publié le décret de la loi 192/2005 visant l'application de la DPEB au niveau national et fixant les exigences minimales pour la performance énergétique, et pour le coefficient de transmission thermique pour les fenêtres, les murs, les planchers et les toits, en cas de nouvelles constructions et les rénovations majeures (ENEA, 2005). Les valeurs varient selon le type de bâtiment, la zone climatique, le degré jour, et la surface du vitrage) par rapport au volume de la construction.

En cas de rénovation du système de chauffage, tout comme avec les nouveaux systèmes, le rendement saisonnier devrait être supérieur à  $(75 + 3 \log P_n)\%$ , où  $P_n$  est la puissance de sortie nominale de la chaudière. En cas de substitution de la chaudière, le rendement minimal de la chaudière devrait être supérieur à  $(90 + 2 \log P_n)\%$ . Dans le cas d'une pompe à chaleur, l'efficacité minimale doit être supérieure à  $(90 + 3 \log P_n)\%$ .

Finalement vient le décret législatif 28/2011 concernant les exigences lors de l'utilisation des énergies renouvelables pour les bâtiments neufs et la rénovation de l'existant. Il définit une part de production renouvelable minimale de 35% pour les bâtiments construits entre 2014 et 2016 et 50 % pour ceux qui vont être construits à partir de 2017 (ENEA, 2011).

### 1.3.1.3 La réglementation thermique en Algérie

L'Algérie est le premier pays du Maghreb à avoir mis en place une réglementation thermique des bâtiments depuis 1997 et qui est devenue obligatoire à partir de 2000. Pour les calculs des

besoins de chauffage, la réglementation propose deux méthodes de calcul dont l'objectif est le contrôle des besoins de chauffage et de refroidissement (D.T.R. C 3-2, 1997):

- Le calcul statique en thermique de bâtiment dont les concepteurs doivent vérifier que les déperditions par transmission du logement sont inférieures aux déperditions de référence.
- Le calcul dynamique en régime variable dont les concepteurs doivent comparer entre les besoins dynamiques de chauffage (Bdyn) calculés par un logiciel thermique dynamique et les déperditions de base (DB) :
  - ✓ Si  $B_{dyn} \geq DB$  ; il faut prendre DB ;
  - ✓ Si  $B_{dyn} < DB$  ; deux cas peuvent se produire. Si  $B_{dyn} \leq 0,8 DB$ , dans ce cas il faut prendre 0,8 DB si non Bdyn.

Concernant les besoins de climatisation, la réglementation propose une méthode de calcul basée sur le calcul des apports calorifiques des bâtiments (D.T.R. C 3-4, 1997). Il faut vérifier que la somme des apports calorifiques par les parois vitrées et les parois opaques est inférieure aux apports calorifiques de références calculés au mois de juillet à 15 h pour une température sèche intérieure de 27°C, en fonction de la zone climatique dans le pays.

#### **1.3.1.4 La réglementation thermique des bâtiments en Tunisie**

La réglementation thermique en Tunisie a été publiée par l'Arrêté du 23 juillet 2008 pour les constructions à usage de bureau (ANME, 2008) et par l'Arrêté du 01 juin 2009 pour les bâtiments à usage résidentiel (ANME, 2009). Elle vise à limiter les besoins énergétiques du bâtiment liés au conditionnement (Chauffage et Refroidissement), et améliorer les caractéristiques thermiques de l'enveloppe. Deux approches sont donc proposées :

- L'approche dite prescriptive qui définit les valeurs maximales à ne pas dépasser en ce qui concerne le coefficient de transmission de toiture, des murs extérieurs et des baies vitrées ainsi que le coefficient de transmission solaire thermique équivalent des fenêtres en fonction du taux global des baies vitrées. Cette approche ne s'applique pas dans le cas où le taux global des baies vitrées est supérieur à 45% de la surface des murs extérieurs et/ou sa distribution sur les orientations « Est » - 45° et les orientations « Ouest » + 45° est supérieure à 35% pour les bâtiments privés et 25 % pour les bâtiments publics.
- L'approche dite performantielle qui consiste à fixer les spécifications techniques minimales en termes de performances thermiques du bâtiment (besoins énergétiques du chauffage et de refroidissement) en fonction de la zone climatique.

#### **1.3.2 La réglementation thermique en France**

La première réglementation thermique en France a été adoptée en 1974 après le premier choc pétrolier afin de réduire la facture énergétique. Depuis, la réglementation thermique française n'a jamais cessé d'évoluer, avec des exigences de plus en plus importantes. Renforcée au fil du temps par un plafond de consommation énergétique faible, elle s'oriente vers une génération des bâtiments à énergie zéro ou à énergie positive (Figure 1-11).

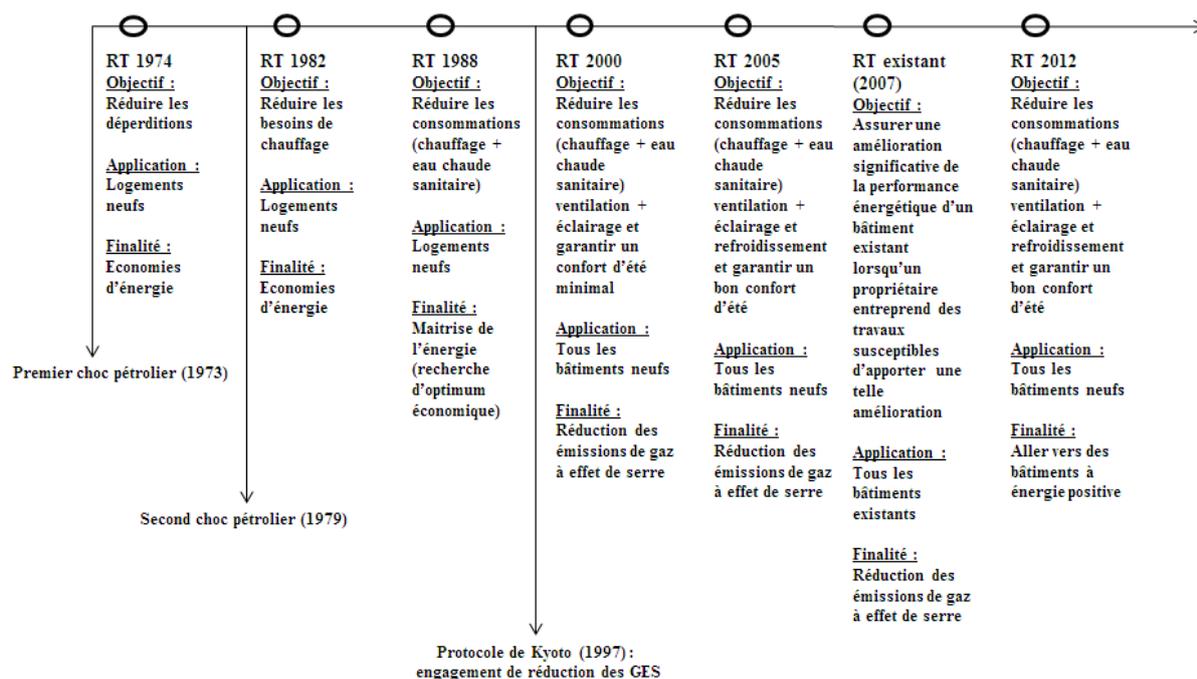


Figure 1-11: Frise chronologique des réglementations thermiques avec les principaux éléments déclencheurs (Patry, Molle, 2013).

### 1.3.2.1 La réglementation thermique des bâtiments neufs

La RT 2012 pour les bâtiments neufs a été mise en œuvre suivant la transposition de la directive EPBD afin de respecter les engagements écologiques du pays dans la continuité des lois Grenelle de l'environnement que nous avons présenté précédemment. Cette réglementation s'applique à tous les bâtiments neufs ou parties nouvelles des bâtiments en rénovation lorsque la surface ajoutée est supérieure à 150 m<sup>2</sup> SHON<sub>RT</sub> (somme des surfaces de plancher de chaque niveau de la construction, après déduction des surfaces de locaux sans équipements de chauffage) ou supérieure à 30% de la SHON<sub>RT</sub> existante. Trois exigences doivent d'être vérifiées en termes de performance énergétique globale (Legifrance, 2012) à savoir :

- ✓ **L'efficacité énergétique minimale du bâtiment :** La RT 2012 introduit la conception bioclimatique du bâtiment par le coefficient de besoin bioclimatique (*B<sub>bio</sub>*, exprimé en nombre de point). Il permet de mesurer la capacité d'un bâtiment à limiter les besoins de chauffage (*B<sub>ch</sub>*), de refroidissement (*B<sub>fr</sub>*) et d'éclairage artificiel (*B<sub>ecl</sub>*), et ce indépendamment des systèmes énergétiques et équipements choisis (chauffage, refroidissement, ventilation, eau chaude sanitaire, éclairage artificiel...)
- ✓ **Une consommation d'énergie primaire limitée :** La consommation conventionnelle des bâtiments pour les usages en éclairage artificiel, chauffage, ventilation, refroidissement, production d'eau chaude sanitaire, et leurs auxiliaires est déterminée par le coefficient Cep. Il est exprimé en kWh/m<sup>2</sup>SHONRT/an. Il est en moyenne sur le territoire limité à 50kWh/m<sup>2</sup>/ an
- ✓ **Un bon confort d'été :** La RT 2012 exige que la température conventionnelle intérieure (*T<sub>ic</sub>* exprimée en degrés) ne dépasse pas, à la fin d'une séquence de journées chaudes successives, une valeur de température de référence *T<sub>icréf</sub>*.

Ces exigences sont calculées selon le zonage climatique de la France qui subdivise le pays en 8 zones (Figure 1-12).

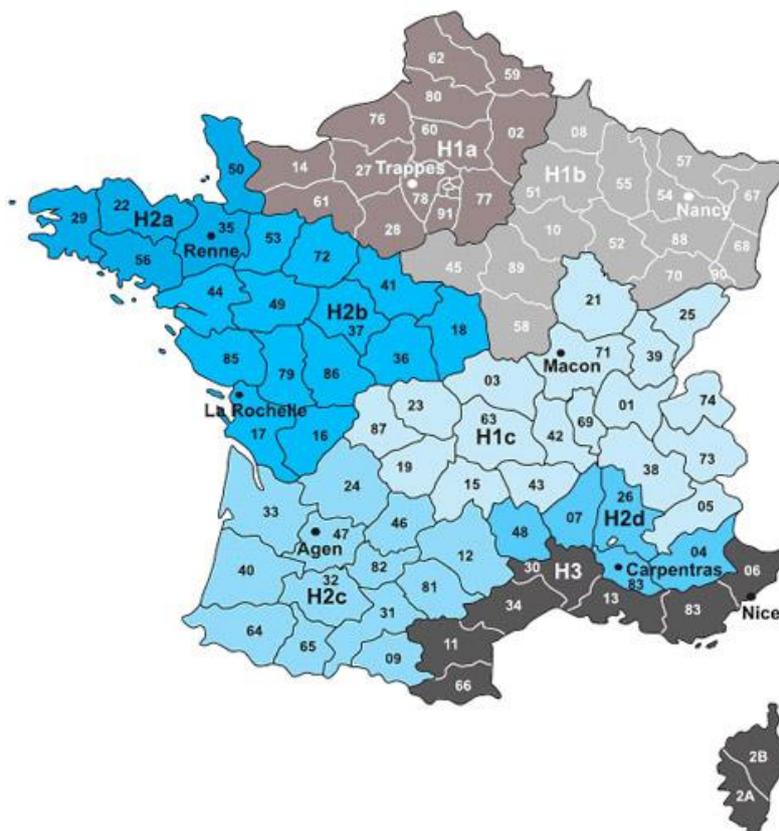


Figure 1-12 : Zonage climatique en France selon la RT 2012.

### 1.3.2.2 La réglementation thermique des bâtiments existants

Le but de la réglementation thermique des bâtiments existants (RT existant) est d'apporter une réelle amélioration au niveau de la performance énergétique et aussi la réduction des émissions des gaz à effet de serre. Elle concerne toutes les constructions existantes, qu'elles soient résidentielles ou non, et définit une performance énergétique minimale, pour chaque élément (ventilation, fenêtre, climatisation, chauffage...) changé ou installé. Cette réglementation se compose de deux volets : « RT globale » et « RT élément par élément » en fonction de la date de construction, de la surface, et de l'importance du budget consacré aux travaux de rénovation énergétique (Figure 1-13).

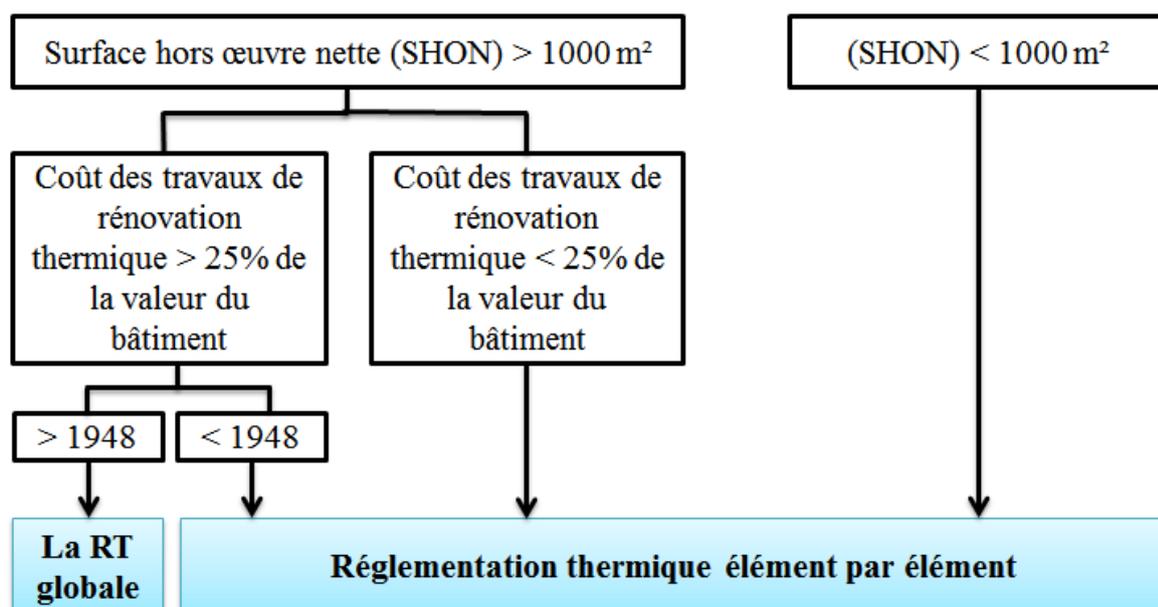


Figure 1-13 : Les conditions d’application de la RT existant.

- **Les exigences de la RT globale :**

Dans le cas des bâtiments construits après 1948 avec un coût des travaux de rénovation thermique qui dépasse 25% de la valeur du bâtiment et une surface SHON supérieure à 1000 m<sup>2</sup>, les exigences suivantes doivent être prises en considération (Legifrance, 2008):

- ✓ La *Cepmax* doit être inférieure à la consommation de référence de ce bâtiment qui correspond à la consommation qu'aurait le bâtiment pour des performances des éléments et des équipements qui le composent. En complément de cette exigence, pour les logements, la réglementation introduit une valeur maximale de consommation d'énergie du bâtiment rénové pour le chauffage, le refroidissement et l'eau chaude sanitaire. Cette valeur dépend du type de chauffage et du climat (Tableau 1-1). Pour les bâtiments non résidentiels, les travaux doivent conduire à un gain de 30% sur la consommation d'énergie par rapport à l'état antérieur.

Tableau 1-1 : Les valeurs du coefficient maximal de la *Cepmax* en kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>.an.

Zone climatique	Type de chauffage	
	Combustibles fossiles ou bois	Chauffage électrique (y compris PAC et réseau de chaleur)
H1	130	165
H2	110	145
H3	80	115

- ✓ Le bâtiment rénové doit assurer un confort d'été acceptable, dans la mesure de ce qui est possible compte tenu du bâtiment existant. La température intérieure conventionnelle atteinte en été doit donc être inférieure à une température de référence.

- ✓ Des performances minimales sont requises pour une série de composants (isolation, ventilation, système de chauffage...), lorsque ceux-ci sont modifiés par les travaux de rénovation (RT élément par élément).

- **Les exigences de la RT élément par élément :**

Cette partie s'applique lorsque les conditions présentées dans la Figure 1-13 sont remplies. Les exigences suivantes doivent être prises en considération (Legifrance, 2007):

✓ **Concernant les parois opaques :**

Ces dispositions s'appliquent aux parois des locaux chauffés dont la surface est supérieure ou égale à 0,5 m<sup>2</sup>, donnant sur l'extérieur, sur un volume non chauffé ou en contact avec le sol. Lorsque des travaux d'installation ou de remplacement de l'isolation thermique sont entrepris sur une paroi, ceux-ci doivent être réalisés de telle sorte que la paroi isolée doit avoir une résistance thermique totale, supérieure ou égale à la valeur minimale donnée dans le Tableau 1-2 ci-dessous.

Tableau 1-2 : Résistance thermique des parois opaques en fonction de la zone climatique.

Zone	H <sub>1</sub> , H <sub>2</sub> et H <sub>3</sub> (altitude > 800 m)	H <sub>3</sub> (altitude < 800 m)	Pour aller plus loin***
Mur extérieur Toiture de pente > 60°	2,3*	2	4,5
Mur sur local non chauffé Plancher sur local non chauffé	2	2	4
Plancher sur l'extérieur Plancher sur vide sanitaire Plancher sur parking collectif	2,3	2	4,5
Comble perdu	4,5	4,5	7,5
Comble aménagé Toiture de pente < 60°	4**	4**	7,5
Toiture terrasse	2,5	2,5	6

\* Si, du fait de l'isolation des murs, la surface habitable est diminuée de plus de 5% alors il est possible de ne mettre qu'une résistance thermique R=2 m<sup>2</sup>.K/W

\*\* Si, du fait de l'isolation de la toiture sous rampant, la surface habitable est diminuée de plus de 5% alors il est possible de ne mettre qu'une résistance R=3 m<sup>2</sup>.K/W

\*\*\* Cette colonne reprend les caractéristiques thermiques couramment utilisées pour réaliser des bâtiments BBC.

✓ **Concernant les fenêtres :**

Les fenêtres doivent posséder les performances énergétiques minimales présentées dans le Tableau 1-3 ci-dessous.

Tableau 1-3 : Caractéristique des fenêtres et du vitrage.

Type de menuiserie	U <sub>w</sub> * max en W/(m <sup>2</sup> .K)	U <sub>g</sub> ** max en W/(m <sup>2</sup> .K)
Menuiserie coulissante	2,6	2
Autre cas	2,3	2

\* $U_w$  : caractéristique thermique de la fenêtre dans sa globalité

\*\* $U_g$  : caractéristique thermique du vitrage

✓ Ventilation :

Les auxiliaires de ventilation installés ou remplacés dans les locaux d'habitation devront présenter une consommation maximale de  $0,25 \text{ Wh/m}^3$  par ventilateur, qui peut être porté à  $0,4 \text{ Wh/m}^3$  en présence de filtres (pour les ventilations double flux).

✓ Chauffage :

La réglementation impose un rendement minimum lors du remplacement d'un système de chauffage par une chaudière. Ce rendement minimum est variable en fonction de la puissance installée. Dans les plages de puissance standard, ce rendement doit être supérieur à 90 %. L'installation d'une chaudière doit être obligatoirement accompagnée de la mise en place d'un appareil de régulation programmable.

Dans le cas d'un poêle à bois ou un foyer, ce rendement minimal est ramené à 65%. La réglementation impose aussi dans le cas d'une pompe à chaleur un Cop (coefficient de performance) nominal minimum de 3,2 à l'exception d'une source froide de type air extérieur, à eau avec capteurs enterrés ou à fluide avec capteurs enterrés lorsque la température de la source chaude et de  $45^\circ \text{ C}$ , dans ce cas le Cop minimal est 2,7.

✓ La distribution et l'émission de chaleur

Une isolation est imposée pour les canalisations passant par l'extérieur ou par les locaux non chauffés lors de l'installation ou le remplacement du réseau de distribution de chaleur. L'isolant utilisé doit avoir une épaisseur au moins égale à la moitié du diamètre extérieur du tuyau.

Dans le cas d'un plancher chauffant qui se trouve au-dessus d'un local non chauffé, la réglementation impose d'isoler le plancher en question afin d'atteindre une résistance thermique de paroi au moins égale à  $2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  pour un plancher chauffant électrique et à  $1,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  dans le cas d'un plancher chauffant à eau.

✓ Eau chaude sanitaire :

La réglementation impose d'opter pour un modèle bien isolé des chauffe-eau électriques. Le coefficient mesurant les pertes du ballon est habituellement noté  $Q_{pr}$  et s'exprime en kWh par 24h. La réglementation impose un  $Q_{pr}$  maximum selon la formule suivante :

- Pour un chauffe-eau de volume  $V < 75 \text{ L}$  :  $Q_{prmax} = 0,1474 + 0,071 \times \frac{2V}{3}$
- Pour un chauffe-eau horizontal de volume  $V > 75 \text{ L}$  :  $Q_{prmax} = 0,75 + 0,008 \times V$
- Pour un chauffe-eau vertical de volume  $V > 75 \text{ L}$  :  $Q_{prmax} = 0,22 + 0,057 \times \frac{2V}{3}$

Pour les chauffe-eau fonctionnant au gaz, le nouveau système doit respecter la norme EN 89 pour les accumulateurs et la norme EN 26 pour les chauffe-eau à production instantanée.

✓ La climatisation :

La RT existante impose des conditions de performance sur le système installé et sur les baies orientées au nord des pièces concernées :

- Si la puissance du climatiseur est inférieure à 12 kW, l'étiquette énergie de celui-ci doit obligatoirement être du niveau A ou B.
- Si la puissance du climatiseur est supérieure à 12 kW, le coefficient d'efficacité frigorifique du climatiseur (EER) en mode froid doit respecter les conditions présentées dans le Tableau 1-4.

Tableau 1-4 : le coefficient EER minimal en fonction de type de climatiseur.

Type d'équipement	EER minimal	Température de source
Air-air	2,8	27 °C (air)
Eau-air	3	
Air-eau	2,6	7 °C (eau)
Eau-eau	3	

- Les baies non orientées au nord des pièces climatisées doivent obligatoirement être munies de protections solaires mobiles. Le facteur solaire de ces baies avec leur protection doit être inférieur ou égal à 0,15.

### 1.3.3 La réglementation thermique au Maroc

La réglementation thermique marocaine a enfin vu le jour par la publication du décret n° 2-13-874 du 15 octobre 2014 dans le bulletin officiel n° 6306 le 06 Novembre 2014 (ADEREE, 2014a). Ce décret approuve le règlement général de construction fixant les règles de performance énergétique des constructions et instituant le Comité National de l'Efficacité Énergétique dans le Bâtiment.

La Réglementation Thermique de Construction au Maroc (RTCM) élaborée par l'ADEREE (Agence de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique) vise essentiellement à améliorer les performances thermiques des bâtiments neufs (ADEREE, 2015b). Elle est très semblable à la réglementation thermique tunisienne dans sa forme générale.

Pour l'application de cette réglementation, des travaux de zonage climatique ont été réalisés en coordination avec la Direction de la Météorologie Nationale (DMN, 2011). Le territoire marocain a été subdivisé en six zones climatiques (Figure 1-14) en se basant sur le nombre de degrés-jours d'hiver et d'été.

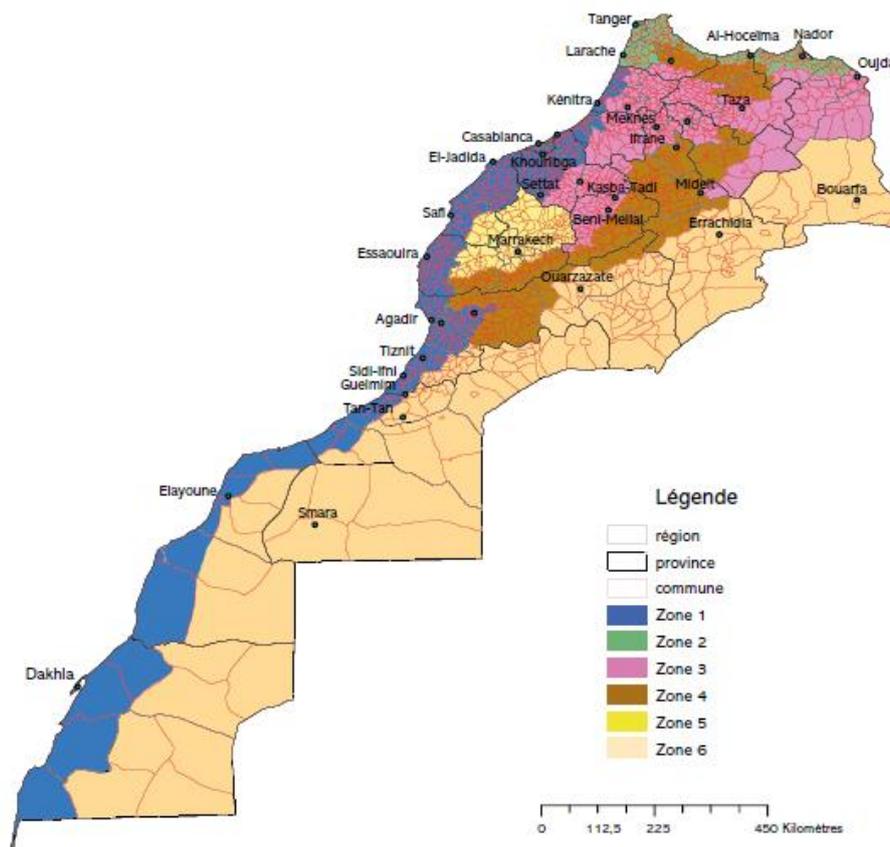


Figure 1-14 : Définition des zones climatiques du Maroc dans le cadre de la RTCM.

La RTCM définit des exigences à respecter pour la conception des bâtiments neufs, selon la zone climatique et le type de bâtiment (résidentiel ou tertiaire). Cependant, l'une des approches suivantes doit être prise en considération pour le calcul réglementaire (ADEREE, 2014b):

- **L'approche dite performantielle** définit les besoins énergétiques de conditionnement maximaux du bâtiment (la somme des besoins annuels de chauffage et de refroidissement) exprimés en kWh/m<sup>2</sup>/an, selon la zone climatique et le type de bâtiment étudié (Tableau 1-5). Le calcul de ces besoins doit être conforme aux dispositions de la norme marocaine NM EN 15265, ainsi qu'aux normes EN12831 et ANSI/ASHRAE/ACCA standard 183-2007. Ces besoins peuvent être aussi calculés par un logiciel de simulation thermique dynamique (comme TRNSYS, CODYBA, DESIGNBUILDER...). Les conditions intérieures de calcul doivent être conformes aux dispositions de la norme marocaine NM ISO 7730. Les températures intérieures de référence pour le chauffage et la climatisation sont respectivement 20°C et 26°C. Pour l'humidité, les valeurs de références sont respectivement 55% et 60% pour l'hiver et l'été.

Tableau 1-5 : Besoins thermiques maximaux des bâtiments au Maroc en kWh/m<sup>2</sup>.an.

Zones	Résidentiels	Ecoles	Administrations	Hôpitaux	Hôtels
<b>Agadir Z1</b>	40	44	45	72	48
<b>Tanger Z2</b>	46	50	49	73	52
<b>Fès Z3</b>	48	61	49	68	66
<b>Ifrane Z4</b>	64	80	35	47	34
<b>Marrakech Z5</b>	61	65	56	92	88
<b>Errachidia Z6</b>	65	67	58	93	88

- **L'approche dite prescriptive** consiste à fixer les spécifications techniques exprimées, pour chaque type de bâtiment et chaque zone climatique, sous forme de coefficients maximaux de transmission thermique surfacique des toitures, des murs extérieurs, du plancher sur pilotis, des baies vitrées ainsi que du facteur solaire équivalent (incluant l'effet des protections solaires) des baies vitrées et à la résistance thermique (R) des planchers, en fonction du rapport du taux global des baies vitrées (Annexe A-1). L'utilisation des vitrages teintés, réfléchissants ou spéciaux est exigée lorsque les protections solaires extérieures ne peuvent être envisagées ou sont insuffisantes. Cette approche est applicable seulement dans le cas où le TGBV (Taux Global des Baies Vitrées) est inférieur à 45%. Ces spécifications techniques peuvent être calculées par les formules statiques facilement programmables sous Excel ou par des outils informatiques comme le logiciel BINAYATE Prescriptive développée par l'ADEREE.

La réglementation thermique marocaine a aussi défini des exigences limites pour le coefficient de performance des pompes à chaleur en fonction du mode de fonctionnement et de type du système (Tableau 1-6).

Tableau 1-6 : Exigences limites pour le coefficient de performance des pompes à chaleur au Maroc.

Catégorie	Mode de fonctionnement	Climatiseurs split et multi-Split	Climatiseurs monoblocs
Climatiseurs à condensation par air	Refroidissement	EER > 2.8	EER > 2.6
	Chauffage	COP > 3.2	COP > 3.0
Climatiseurs à condensation par eau	Refroidissement	EER > 3.1	EER > 3.8
	Chauffage	COP > 3.2	COP > 3.0

### ➤ Analyse critique de la RTCM

La RTCM dans sa première version est très simple afin de faciliter sa mise en application que ce soit par les architectes ou par les bureaux d'études. De plus, les solutions techniques proposées seront faciles à mettre en œuvre par les entreprises, sachant que le marché de la construction au Maroc connaît toujours des difficultés à cause d'une main d'œuvre rarement qualifiée. Cependant, en faisant une analyse critique de cette réglementation nous constatons qu'il existe certaines ambiguïtés.

La RTCM est basée sur une étude paramétrique réalisée par l'équipe du professeur Sick (Sick et al., 2014). Dans cette étude, les calculs ont été effectués pour le cas d'un bâtiment

résidentiel (logement collectif) et d'un bâtiment tertiaire (administration public). D'autres typologies de bâtiment ont aussi été étudiées, mais les résultats n'ont pas été publiés.

Le

Tableau 1-7 présente le coefficient de transmission des murs extérieurs, du plancher et de la toiture pour ces deux cas utilisés pour l'élaboration de la RTCM.

Tableau 1-7 : Les caractéristiques des parois opaques des bâtiments au Maroc utilisées pour l'élaboration de la RTCM.

	<b>Matériaux</b>	<b>Epaisseur</b>	<b>U-value (W/m<sup>2</sup>.K)</b>
Murs extérieurs	Brique	10 cm	1,172
	Lame d'air	10 cm	
	Brique	10 cm	
Toiture	Hourdis	16 cm	2,283
Plancher	Dallage en béton armé	20 cm	3,947

Dans un premier temps, nous constatons que la constitution des parois ne correspond pas à la réalité des constructions au Maroc. Le Tableau 1-8 présente les données qui sont recueillies via des visites des chantiers et des bases de données des mesures réalisées sur les matériaux de construction au Maroc (Ross et al., 2013).

Tableau 1-8 : Les caractéristiques des parois opaques des bâtiments au Maroc.

	<b>Matériaux</b>	<b>Epaisseur</b>	<b>U-value (W/m<sup>2</sup>.K)</b>
Murs extérieurs	Enduit ciment	1,5 cm	1,2
	Brique	7 cm	
	Lame d'air	10 cm	
	Brique	7 cm	
	Enduit ciment	1,5 cm	
Toiture	Carrelage	0,7 cm	2,04
	Mortier	5 cm	
	Dalle en béton armé	4 cm	
	Hourdis	16 cm	
	Enduit ciment	1 cm	
Plancher	Carrelage	0,7 cm	3,14
	Mortier	5 cm	
	Dallage en béton armé	15 cm	

La RTCM oblige l'isolation du plancher bas dans les villes de Marrakech, Ifrane, Fès et Errachidia. Ceci est en contradiction avec les caractéristiques climatiques de ces villes. Par exemple à Marrakech, le climat est légèrement froid en hiver et très chaud en été, l'isolation du plancher en contact avec le sol n'a donc aucun intérêt. Au contraire, le sol avec une

température moyennement stable permet en l'occurrence d'éviter les déperditions thermiques en hiver et de rafraîchir l'ambiance intérieure en été.

L'étude paramétrique réalisée comporte sur la variation de 3 épaisseurs d'isolation des parois opaques (murs, plancher et toiture), la variation de 4 types de vitrage avec 4 taux de baies vitrées et finalement quatre orientations ont été prises en compte (Est/Ouest/Sud-Ouest/Nord-Est). Au total 1728 simulations ont donc été réalisées pour chaque zone climatique. Si on compte 2 minutes par simulation via TRNSYS (logiciel utilisé pour l'élaboration de la RTCM), le temps de calcul était donc de 2 jours et 4 heures. Ces configurations sont très limitées pour pouvoir conclure sur les prescriptions et les performances énergétiques exigées des bâtiments.

De plus, la température de consigne de climatisation utilisée dans ces calculs était de 24°C ce qui est différent de celle définie par le texte réglementaire qui est de 26°C. Les données utilisées pour les simulations sont présentées dans le Tableau 1-9.

Tableau 1-9 : Données utilisées pour l'élaboration de la RTCM (Sick et al., 2014).

	Résidentiel				Tertiaire	
	lundi à vendredi		Week-End		lundi à vendredi	Week-End
	7 :30 – 17 :00	17 :00 – 7 :30	7 :30 – 17 :00	17 :00 – 7 :30	8 :30 – 16 :30	-
Le nombre d'occupants	2	5	5	5	300	-
Taux de ventilation incluant les infiltrations d'air	30m <sup>3</sup> /h par personne				30m <sup>3</sup> /h par personne	-
Gain interne	2500 kWh/an par habitation				77 KW	-
Taux de réduction du rayonnement solaire sur les baies vitrées (entre le 15 mai et le 15 septembre)	50%		50%		50%	50%

La fixation d'un taux de réduction du rayonnement solaire sur les baies vitrées à 50% ne permet pas d'avoir une idée claire sur l'utilisation des protections solaires en fonction du type de vitrage. Par exemple, un vitrage à contrôle solaire ne nécessite pas une protection solaire par l'extérieur. Et donc ce taux devrait être variable selon la conception architecturale et le type de vitrage.

Au Maroc, il n'existe pas de contrainte spécifique sur l'étanchéité à l'air et la ventilation des bâtiments. Pour ventiler, les habitants utilisent souvent l'aération par ouverture des fenêtres

même si les conditions extérieures sont parfois défavorables pour le confort. A cet effet, le taux de renouvellement d'air devrait être mieux défini.

Les ponts thermiques et l'absorption solaire des parois peuvent aussi jouer un rôle important pour l'évaluation des performances énergétiques du bâtiment au Maroc. Il serait nécessaire que les valeurs de références utilisées pour mettre en place la réglementation soient définies..

### 1.3.4 Les labels

Un label est une démarche volontaire qui permet d'aller plus loin que la réglementation thermique en vigueur. Des aides financières, fiscales ou urbanistiques y sont généralement attachées.

#### 1.3.4.1 Labels pour le bâtiment neuf en France

En France, après la sortie de la RT2012 plusieurs labels ont été annulés ou modifiés vu les nouvelles performances qui les dépassaient par cette réglementation. A l'heure actuelle, il existe deux labels pour la conception des bâtiments neufs :

- **Le label Effinergie+** : Ce label exige d'avoir une amélioration du Bbiomax et de Cepmax de 20%. A l'exception des bureaux et des commerces, où le Cepmax doit être amélioré de l'ordre de 40%.L'étanchéité à l'air ne doit pas dépasser  $0,4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$  en maison individuelle,  $0,8 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$  en logement collectif et  $1,2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$  en tertiaire de moins de 3000 m<sup>2</sup>.Il est également conseillé de prendre en considération le confort visuel, acoustique, d'été et la qualité de l'air intérieur ainsi que l'énergie grise du bâtiment. (Effinergie, 2014).
- **Le label Bepos Effinergie 2013** : Ce label s'appuie sur la RT 2012 et sur le label Effinergie+ pour la contribution à des bâtiments à énergie positive objet de la future réglementation de 2020. Il est applicable pour les bâtiments du secteur résidentiel individuel ou collectif ainsi que du secteur non résidentiel. La consommation d'énergie primaire non renouvelable entrant dans le projet, diminuée de la production locale d'énergie sortant du projet doit être inférieure ou égale à un écart autorisé. Cela est effectué en multipliant les énergies entrante et sortante par les coefficients de conversion en énergie primaire non renouvelable définis dans le Tableau 1-10 (Effinergie, 2013) ci-dessous.

Tableau 1-10 : Coefficients conventionnels de passage en énergie primaire non renouvelable.

Energie	Coefficient pour l'énergie entrante	Coefficient pour l'énergie sortante
Électricité	2,58	-2,58
Bois	0	-
Réseau de chaleur lorsque la chaleur est produite au moins à 50 % à partir de biomasse, de géothermie, d'incinération de déchets ou d'énergie de récupération	0,5 ou La part de non-EnR si celle-ci est certifiée par un organisme indépendant	-
Autres réseaux de chaleur	1	-

Gaz, fioul, autres	1	-
--------------------	---	---

L'écart accepté à l'énergie positive est la somme de la consommation de référence pour les usages réglementés et de la consommation de référence pour les usages non pris en compte par la RT ( $Aue_{ref}$ ) et à laquelle on soustrait une production de référence ( $Prod_{ref}$ ). Cet écart s'écrit :

$$Ecart_{accepté} = 40 \times M_{ctype} \times (M_{cgéo} + M_{calt} + M_{c surf}) + Aue_{ref} - Prod_{ref} \quad \text{Eq.1}$$

Avec :

$M_{ctype}$ ,  $M_{cgéo}$ ,  $M_{calt}$ ,  $M_{c surf}$  sont les coefficients définis dans les règles techniques du label Effinergie+.

$Aue_{ref}$  est la consommation d'énergie de référence pour les usages non pris en compte par la RT (Tableau 1-11).

Tableau 1-11 : La consommation d'énergie de référence  $Aue_{ref}$ .

Type de bâtiment	$Aue_{ref}$ en kWh ep/m <sup>2</sup> .an
Logement	70
Bureau	100
Enseignement, Crèche	30
Autres typologies	100

$Prod_{ref}$  est la production d'énergie de référence calculée par l'équation suivante :

$$Prod_{ref} = 110 \times M_{pgeo} \times M_{pniv} \quad \text{Eq.2}$$

$M_{pniv}$  est une modulation qui varie en fonction du nombre de niveau maximal autorisé par les documents d'urbanisme et  $M_{pgeo}$  tient compte du potentiel solaire local défini en fonction de la zone climatique. Les valeurs de ces deux coefficients sont données par la Figure 1-15 :

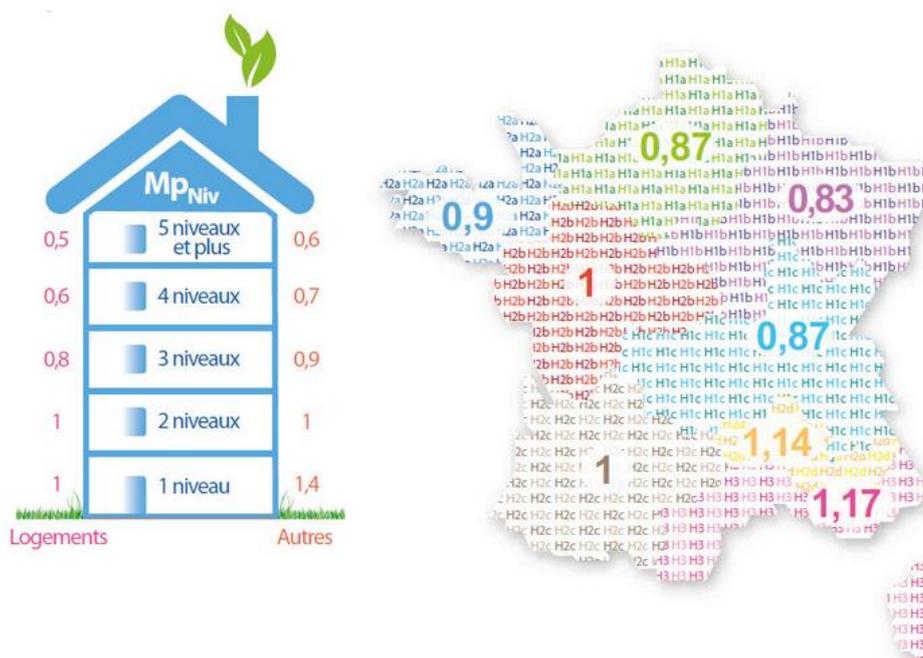


Figure 1-15 : La valeur de  $Mp_{geo}$  en fonction de la zone climatique et le type de logement.

### 1.3.4.2 Labels pour le bâtiment existant en France

Comme pour le neuf, il existe des labels pour les bâtiments rénovés qui valorisent le fait qu'un propriétaire fait mieux que ce que la réglementation lui impose. L'arrêté du 29 septembre 2009 définit le label «haute performance énergétique rénovation » qui se décline en deux niveaux (Legifrance, 2009a):

- **HPE Rénovation:** Ce label sanctionne la démarche de réaliser une opération de rénovation performante du point de vue énergétique et permet l'obtention des aides financières. Il s'applique uniquement aux bâtiments achevés après le 01 janvier 1948. La consommation conventionnelle après travaux s'exprime sous la forme :  $Cep < 150 \times (a + b)$  modulé selon la zone climatique et la région (Figure 1-16).
- **BBC Rénovation ou Effinergie-Rénovation:** Ce label s'applique uniquement pour les bâtiments construits après 1948. La consommation conventionnelle après travaux s'exprime sous la forme :  $Cep < 80 \times (a + b)$  modulé selon la zone climatique et la région (Figure 1-16).

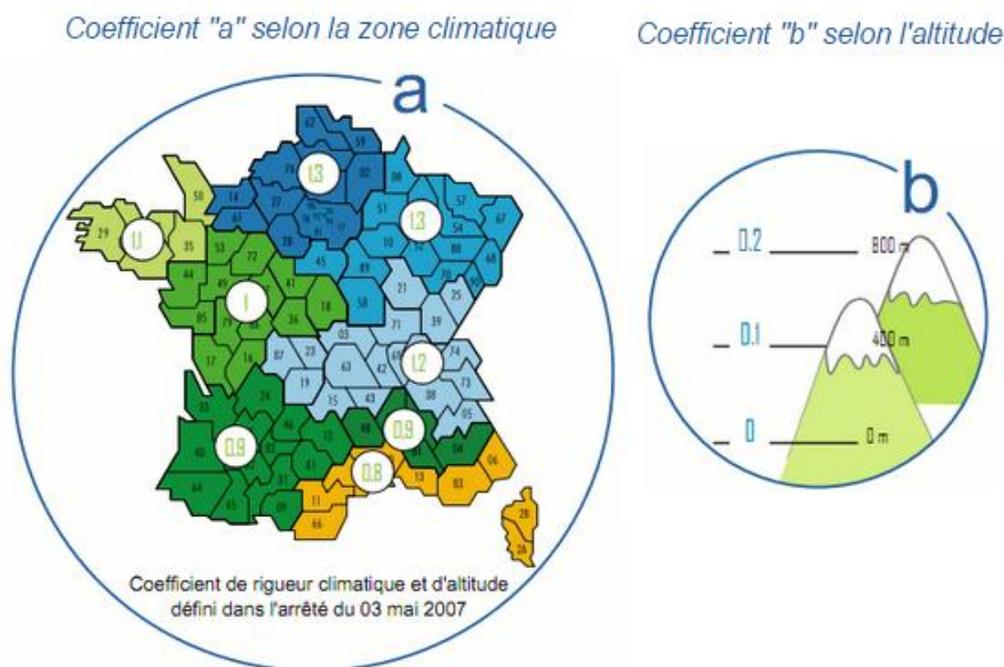


Figure 1-16 : Coefficient de rigueur climatique et d'altitude.

#### Cas particulier :

Pour les bâtiments à usages autres que d'habitation, la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux doit être inférieure de 40% à la consommation conventionnelle de référence définie dans la Réglementation Thermique dite Globale.

#### **1.3.4.3 Le label Minergie**

Créé en 1996, le label suisse Minergie est applicable pour les bâtiments neufs ou rénovés, principalement en Suisse, mais aussi en France, en Italie, au Luxembourg et en Allemagne (Maes, 2009). Il présente l'originalité d'offrir le choix entre six niveaux de performance (Minergie, 2015):

- Minergie standard ;
- Minergie-P ;
- Minergie-A ;
- Minergie Eco ;
- Minergie Eco-P.
- Minergie Eco-A.

Le **Minergie standard** est un label de qualité en termes de performance énergétique et de confort thermique destiné aux bâtiments neufs et rénovés. Les exigences suivantes doivent être respectées:

- Exigences primaires pour l'enveloppe du bâtiment ;
- Valeur limite Minergie (indice énergétique pondéré) ;
- Justificatif du confort thermique en été ;

- Exigences supplémentaires suivant la catégorie de bâtiment : éclairage, froid industriel et production de chaleur ;
- Surcoûts ne dépassant pas 10 % par rapport à des bâtiments conventionnels équivalents ;
- Un renouvellement de l'air avec une aération de type double flux.

Des solutions standard peuvent être suffisantes pour les logements d'habitation afin d'atteindre les exigences du label Minergie. Ces solutions traitent de l'enveloppe (Tableau 1-12).

Tableau 1-12 : Les exigences minimales du label Minergie pour le coefficient U (W/m<sup>2</sup>.K) des parois.

Elément de construction	En contact avec l'extérieur ou < 2 m sous-sol	Locaux non chauffés ou > 2 m sous-sol
<b>Toiture, Plafond</b>	0,15	0,2
<b>Mur</b>	0,15	0,2
<b>Sol</b>	0,15	0,2
<b>Sol avec chauffage par le sol</b>	0,15	0,2
<b>Fenêtres</b>	1,00	1,60
<b>Portes *</b>	1,20	2,00
<b>Caisson de store</b>	0,45	0,5

\*Les exigences pour les portes ne sont pas obligatoires

L'étanchéité à l'air de l'enveloppe doit être également soignée. Le système de ventilation conseillé est la ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. L'efficacité du récupérateur de chaleur doit être supérieure à 80% et la consommation du ventilateur doit être inférieure ou égale à 0,4 Wh/m<sup>3</sup>.

Concernant le confort thermique d'été, les conditions suivantes doivent être remplies :

- pas de lanterneaux ou de fenêtres de toitures avec une surface de vitrage > 0,5 m<sup>2</sup> ;
- protection solaire extérieure mobile avec stores ou stores à lamelles ;
- refroidissement nocturne au moyen de l'aération par les fenêtres.

Pour la production de chaleur, cinq systèmes sont conseillés :

- Pompe à chaleur avec sonde géothermique;
- Chauffage au bois + capteurs solaires;
- Chauffage au bois automatique;
- Récupération des rejets de chaleur;
- Pompe à chaleur air / eau.

**MINERGIE-P** est un label qui intègre en grande partie les critères des constructions passives et donc une sur-isolation des parois, une étanchéité à l'air contrôlée, et une ventilation double flux à haut rendement. La consommation d'énergie primaire doit être inférieure à 30 kWh/m<sup>2</sup>/an et les besoins en chauffage inférieurs à 15 kWh/m<sup>2</sup>/ an. Le dimensionnement de la puissance de chauffage doit être inférieur à 10 W/m<sup>2</sup>.

**MINERGIE-A** récemment publié est un label qui ramène vers des logements d'habitation à énergie positive. Le bilan énergétique d'un bâtiment doit au minimum atteindre un équilibre

entre la production et la consommation. Cela signifie que les besoins pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la ventilation doivent être entièrement couverts par des énergies renouvelables, que ce soit par l'énergie solaire, la biomasse (bois) ou la géothermie. Sur une année, le bilan doit donc être nul, voire positif. Les exigences suivantes doivent être respectées :

- Une ventilation mécanique contrôlée à haut rendement ;
- Les besoins de chauffage des bâtiments neufs doivent être inférieurs à 90% de la valeur réglementaire ;
- Energie finale limite nulle (lors de l'utilisation d'installations solaires thermiques en combinaison avec de la biomasse, la valeur limite monte à 15 kWh/m<sup>2</sup> pour que l'installation solaire thermique couvre au moins 50% des besoins de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude) ;
- L'énergie grise ne doit pas dépasser 50 kWh/m<sup>2</sup> ;
- Une étanchéité à l'air renforcée ( $n_{50}=0,6\text{ h}^{-1}$  pour le neuf et  $n_{50} = 1,5\text{ h}^{-1}$  pour l'existant) ;
- L'utilisation des appareils à haute efficacité énergétique et un confort thermique respectant la réglementation en vigueur.

La Figure 1-17 compare les exigences des trois standards : Minergie, Minergie-P et Minergie-A.

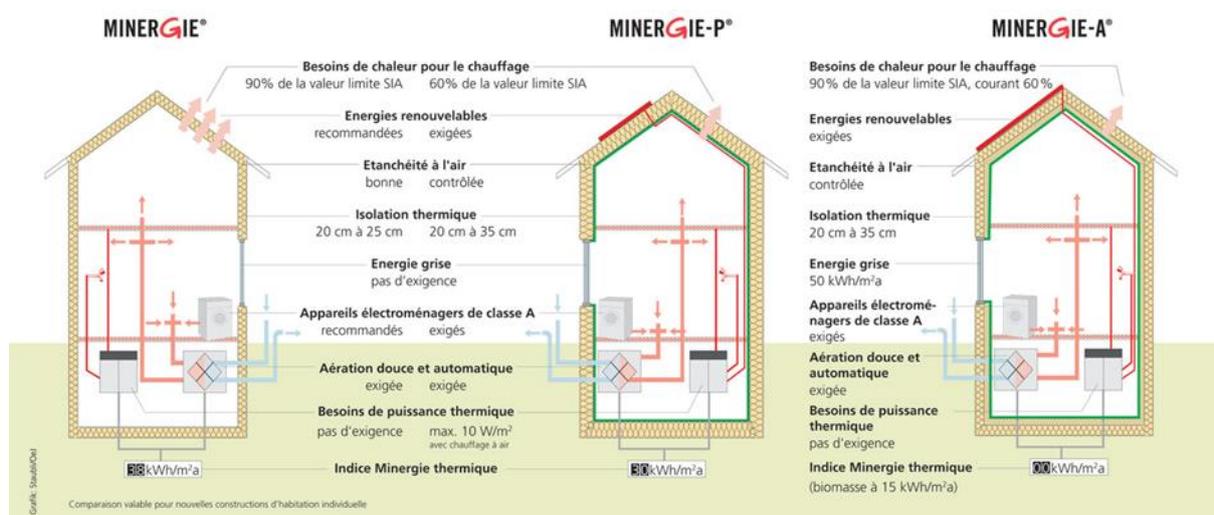


Figure 1-17 : la comparaison entre les différents labels Minergie

En plus des exigences d'efficacité énergétique et de confort thermique, ces trois labels sont améliorés pour intégrer le volet de construction saine et écologique (Minergie-ECO, Minergie-P-Eco et Minergie-A-Eco).

#### 1.3.4.4 Le label Passivhaus

Le label Passivhaus d'origine allemande a été développé en 1996 (PASSIVHAUS, 2015). Ce label est destiné aux bâtiments résidentiels et tertiaires. Pour atteindre le standard Passivhaus, il est nécessaire d'avoir :

- Un besoin annuel de chauffage < 15 kWh/m<sup>2</sup>/an (énergie finale) ;
- Etanchéité de l'enveloppe :  $n_{50} < 0.6\text{ m}^3/\text{h}/\text{an}$  ;

- Energie primaire consommée < 120 KWh/m<sup>2</sup>shab/an ce qui correspond à un besoin <50KWh/m<sup>2</sup>/an en énergie finale (pour le chauffage + l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau + l'électricité consommée par la ventilation + climatisation + l'électricité domestique).

Concernant les gardes fous, le bâtiment Passivhaus doit faire l'objet de la combinaison d'une enveloppe avec une isolation thermique très performante, d'une perméabilité à l'air très faible, de la récupération d'énergie sur la ventilation (double flux avec récupération, puits climatique...) et des sources d'énergies renouvelables. Le Tableau 1-13 indique les solutions techniques préconisées afin d'obtenir un bâtiment Passivhaus (Chlela, 2008).

Tableau 1-13 : Solutions techniques préconisées pour un bâtiment PASSIVHAUS (Chlela, 2008).

Orientation	Sud	Solaire passif
Parois opaques	$U \leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ $\Psi \leq 0,01 \text{ W}/(\text{mK})$	
Baies vitrées	$U \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ $g \leq 0,5$ environ	
Perméabilité à l'air	Inférieure à 0,6 vol/h sous 50 Pa	
Préchauffage de l'air neuf	Puits climatique	Température de sortie $\geq 5^\circ\text{C}$
Ventilation	Double flux et échangeur	Efficacité > 80% Ventilation : < 0,4 Wh/m <sup>3</sup>
ECS	Capteurs solaires ou PAC	
Equipements	Equipements efficaces	

## 1.4 Paramétrage du bâtiment et des systèmes

### 1.4.1 L'emplacement du bâtiment

L'emplacement du bâtiment joue un rôle important pour connaître les impacts de l'environnement sur ses performances énergétiques. Plusieurs paramètres sont liés au choix de terrain (Gonzalo, Habermann, 2008):

- Le climat et le microclimat de la région ;
- L'ombrage proche provenant des bâtiments environnants ou de la végétation (arbre, parc..) ;
- Densité urbaine (site très abrité, moins abrité) ;
- la topographie du terrain ;
- La nature du sol ;
- Le bruit environnant.

Ces paramètres sont spécifiques et uniques à l'endroit de l'implantation du bâtiment. Cependant, ils sont généralement considérés fixes pour les études énergétiques.

### 1.4.2 L'architecture du bâtiment

Les paramètres de conception architecturale comme les surfaces des fenêtres, la compacité, la distribution et le nombre des pièces à l'intérieur du bâtiment sont liés aux exigences du maître

d'ouvrage et de l'innovation de l'architecte. Ces exigences sont souvent spécifiques pour chaque bâtiment. Certains paramètres architecturaux peuvent être discutés avec l'architecte de point de vue énergétique comme la surface des fenêtres dans le cas de la conception des bâtiments neufs.

Vu le prix élevé des travaux d'agrandissement ou d'amoindrissement des baies vitrées (changement des linteaux, maçonnerie ....), la surface des fenêtres reste souvent la même dans le cas de la réhabilitation des bâtiments existants.

Il est à noter que généralement, l'orientation des façades Nord/sud (dans l'hémisphérique nord) est la plus optimale, car elle permet de bénéficier des rayonnements solaires en hiver (réduire les besoins de chauffage) et atténuer les surchauffes en été (Liébard, Herde, 2006). De plus, souvent l'orientation est déjà limitée par le choix de terrain (quartier déjà aménagé).

### **1.4.3 Les éléments de l'enveloppe**

L'enveloppe joue un rôle clé pour la détermination des niveaux du confort thermique, visuel, acoustique et olfactif. Ainsi, elle est un élément majeur pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et diminuer les émissions des gaz à effet de serre, que ce soit dans le neuf ou dans l'existant (Sadineni et al., 2011).

Dans la plupart des pays, la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment a été considérablement négligée (IEA, 2014). Tandis qu'il y avait un succès considérable dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des appareils d'éclairage, de chauffage et de refroidissement, de nombreux bâtiments en cours de construction sont toujours énergivores.

Il est généralement conseillé de commencer par l'étude de l'enveloppe, car, d'une part, ceci permet d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment et de réaliser une approche durable et respectueuse de l'environnement. D'autre part, les maîtres d'ouvrages, les architectes et les décideurs préfèrent des techniques classiques pour simplifier le mieux possible l'exécution du bâtiment, car les technologies innovantes sont encore rares sur le marché, ne sont pas toujours disponibles et parfois très chères.

L'enveloppe est constituée de plusieurs éléments tels que les murs, les ouvertures, le plancher bas, le plancher haut et les protections solaires optionnelles. Les paramètres de l'enveloppe sont liés aux éléments constructifs de ce dernier.

#### **1.4.3.1 Les parois opaques**

La majorité des parois opaques sont construites soit avec des murs en bois, en charpente métallique, en béton, en briques ou en maçonnerie. Elles sont caractérisées par une transmission thermique ( $U$ ), par une capacité thermique ( $\rho C$ ) et par un coefficient d'absorption solaire ( $\alpha$ ).

Pour réduire la valeur du coefficient de transmission des parois, la solution la plus évidente est d'ajouter des matériaux isolants.

Les exigences minimales du coefficient de transmission sont définies par les réglementations thermiques et par les labels (partie 1.3). La Figure 1-18 montre les différentes valeurs limites de ce coefficient définies par les réglementations et les labels.

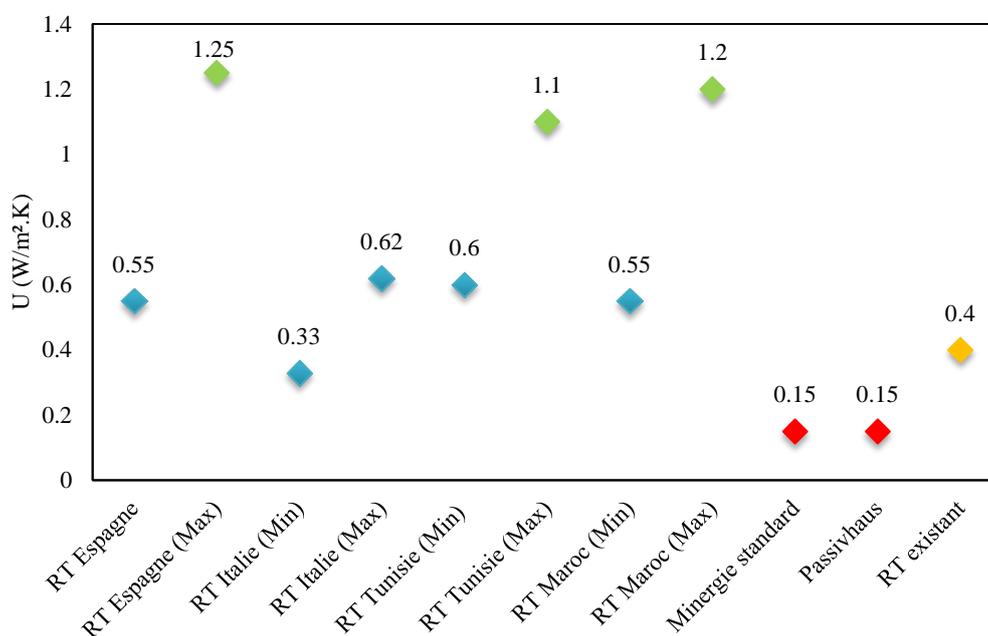


Figure 1-18 : Les exigences minimales du coefficient de transmission des parois.

Pour la conception des bâtiments neufs au Maroc par exemple, l'intervalle de variation de U des parois peut varier entre 0,15 et 1,25 W/m².K. Alors que pour la réhabilitation des bâtiments existants en France ce coefficient peut varier entre 0,15 et 0,4 W/m².K.

Concernant l'absorption des rayonnements solaires par les parois opaques, les revêtements et les peintures peuvent être utilisés pour capter ou non le rayonnement solaire. Ceci est effectué en absorbant le maximum de chaleur dans les climats froids ou en réfléchissant le maximum de rayonnement solaire dans les climats chauds. Dans les climats tempérés, il va falloir chercher un compromis. L'efficacité du mécanisme d'absorption solaire est aussi liée à l'isolation et aux matériaux constitutifs des parois.

Le coefficient d'absorption solaire peut varier de 0,1 à 0,9 selon le type et la couleur du matériau. La valeur 0,1 correspond à une couleur blanche pure (par exemple le blanc de chaux). Alors qu'une valeur élevée de 0,9 correspond à une couleur noire foncée (Ardoise par exemple).

Certains pays comme les Etats Unis, ont introduit des exigences pour le coefficient de réflexion solaire dans la réglementation thermique et les labels. Par exemple dans les parois à faible inclinaison (toiture), la réflexion solaire doit être supérieure à 0,65 pour les constructions neuves et à 0,5 pour l'existant (Akbari, Matthews, 2012). Un bon choix du coefficient d'absorption des parois opaques et surtout de la toiture peut offrir des économies d'énergie jusqu'à 13% (Alpuche et al., 2014) et 45% de réduction de degrés heures d'inconfort d'été (Lapisa et al., 2013).

La capacité thermique est la capacité d'un matériau à absorber, stocker et libérer la chaleur. Dans le bâtiment, avec la variation de la température diurne et nocturne, les impacts thermiques périodiques du rayonnement solaire sur les parois engendrent le phénomène de l'inertie thermique qui correspond à la mise en œuvre de cette capacité thermique. Il est à noter que pour avoir un stockage thermique efficace, la variation de la température ambiante diurne devrait dépasser 10°C (Sadineni et al., 2011). Des études ont montré que le passage d'une inertie faible à une inertie forte peut réduire d'environ 10% la demande de chauffage et de 20% la demande de refroidissement (Aste et al., 2009).

### 1.4.3.2 Les ouvertures

Les ouvertures de l'enveloppe (fenêtres et portes) jouent un rôle essentiel pour le confort thermique, visuel et acoustique. Elles sont aussi importantes du point de vue esthétique pour l'architecture du bâtiment.

Les fenêtres se composent généralement d'une partie dite vitrage et une partie dite cadre. Les vitrages les plus utilisés aujourd'hui dans le monde sont le simple et le double vitrage avec un cadre en aluminium ou en PVC (ANON., 2013).

Généralement dans les climats chauds ou dans les pays en développement, la plupart des fenêtres existantes sont peu performantes. Elles ont une faible résistance thermique et sont extrêmement sensibles au rayonnement solaire. Lors de ces dernières années, certains pays membres de l'OCDE caractérisés par un climat froid ont commencé d'utiliser des fenêtres à double vitrage et faible émissivité avec des cadres à faible transmission. Les fenêtres isolées sont particulièrement importantes pour les climats froids, mais sont également nécessaires dans les climats chauds. Les caractéristiques solaires et optiques des vitrages doivent aussi être optimisées de façon saisonnière en fonction du climat.

Les vitrages se caractérisent par un coefficient de transmission thermique  $U_g$ , par un facteur solaire FS, et par un facteur de transmission lumineuse  $\tau_l$ . Au cours des dernières années, il y a eu des progrès significatifs dans les technologies de vitrage tels que les vitrages isolés (par exemple un double vitrage avec une lame de gaz comme l'argon ou le krypton entre les vitres), les vitrages à contrôles solaires, vitrages à faible émissivité (low-e), etc (Robinson, G Hutchins, 1994). Des fenêtres très performantes sont aussi apparues comme la fenêtre pariétodynamique et les vitrages aérogels qui ont un coefficient de transmission thermique très faible qui varie entre 0,1 et 0,5 W/m<sup>2</sup>.K (Gloriant et al., 2015 ; Jelle et al., 2012).

La Figure 1-19 ci-dessous présente les caractéristiques de certains types de vitrage et la limite réglementaire de la RT-Existant (France), les valeurs minimale et maximale définies par la réglementation thermique marocaine (RTCM-min et RTCM-Max) et le label Passivhaus.

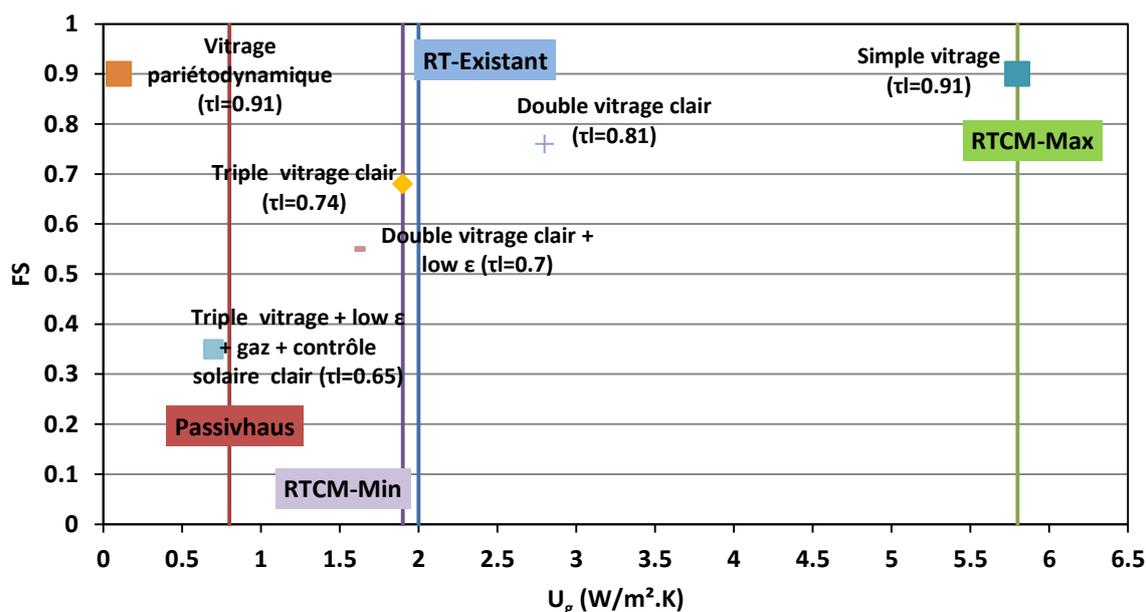


Figure 1-19 : Caractéristique de certains types de vitrage et limites réglementaires du coefficient de transmission thermique.

Pour diminuer le facteur solaire d'un vitrage, deux techniques sont possibles. La première est de déposer sur la face interne de la vitre extérieure une fine couche transparente de métaux nobles par pulvérisation cathodique afin de réaliser un vitrage à contrôle solaire. Ce vitrage permet de bloquer la chaleur jusqu'à 80% (Cuce, Riffat, 2015). La deuxième technique est de réaliser des protections solaires fixes ou mobiles que nous présentons par la suite.

La partie cadre permet de supporter le vitrage. Elle représente généralement entre 10 et 30% de la surface des fenêtres, et est considérée comme une source non négligeable de déperditions de chaleur par transmission (Tsikaloudaki et al., 2015). Comme pour une paroi opaque, elle se caractérise aussi par l'absorption solaire. Cette partie de fenêtre est aussi connue par les pertes de la chaleur dues aux infiltrations d'air. Généralement, il existe cinq grandes familles des matériaux pour les cadres à savoir, l'aluminium, le bois, le PVC, l'acier, et mixte Bois-Aluminium. Le coefficient de transmission de ces matériaux varie généralement entre 1,7 et 5,7 W/m<sup>2</sup>.K (Gustavsen et al., 2011 ; Mitchell, 1982).

### 1.4.3.3 Les ponts thermiques

La discontinuité de l'isolation dans les composants de l'enveloppe cause la variation de la résistance thermique et donc crée ce qu'on appelle les ponts thermiques. Au voisinage de ceux-ci, les lignes de flux thermique se resserrent, ce qui provoque plus d'échange de chaleur par unité de surface. Ces ponts ne causent pas seulement des pertes de chaleur, mais aussi peuvent être sources de condensation (points froids) qui conduisent à des moisissures et à des taches de poussière dues au phénomène de thermophorèse.

Un pont thermique peut être linéaire (l'exemple d'un balcon Figure 1-20-a), auquel on peut attribuer un coefficient de déperdition linéique  $\psi$  (en W/(m.K)) et une longueur L. Il peut être aussi ponctuel, (exemple de dalle champignon Figure 1-20-b) auquel on attribue un coefficient de déperdition  $\chi$  (en W/K). Un bon traitement des ponts thermiques est la

réalisation de l'isolation par l'extérieur qui permet de réduire le coefficient  $\psi$  jusqu'à 0,01 W/(m·K), valeur recommandée par le label Passivhaus. Des études montrent que ce traitement permet de réduire d'une manière significative les besoins de chauffage jusqu'à 12%. Avec moins d'importance dans la période estivale, ce traitement ne permet de réduire que de 2% les besoins de refroidissement (Ge et al., 2013).

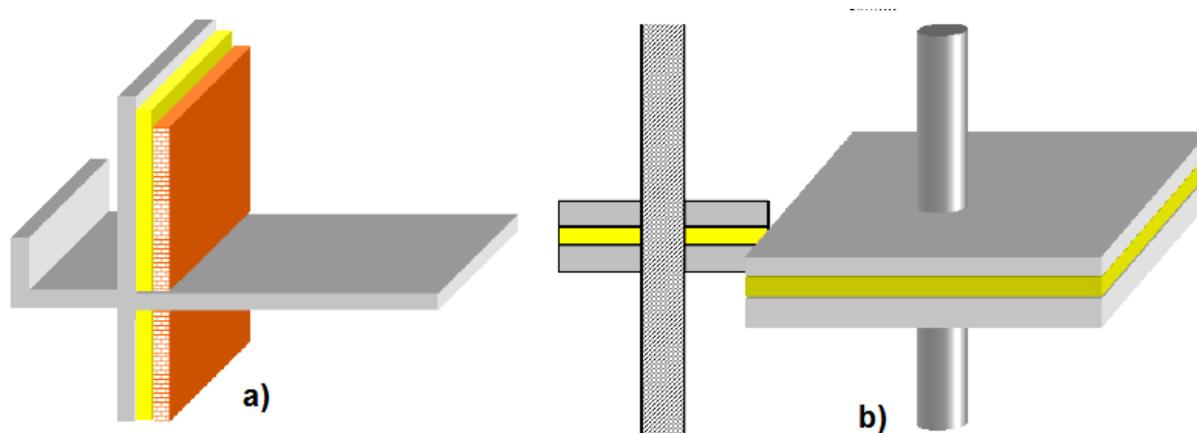


Figure 1-20 : Ponts thermiques types a) linéaire b) ponctuel

#### 1.4.3.4 Protection solaire

Les protections solaires ont le potentiel de réduire principalement les besoins de refroidissement. Il existe trois types de protections solaires. Celles associées au vitrage de la fenêtre (présentées dans la partie 1.4.3.2), Celles fixes qui sont liées à l'enveloppe du bâtiment (les casquettes solaires, brise-soleil...) et les protections solaires mobiles qui peuvent être fermées ou ouvertes en fonction des usagers ou de la gestion technique du bâtiment (les stores, persiennes ...). Ces protections permettent de réduire le facteur solaire, mais réduisent aussi la transmission lumineuse du vitrage.

Les dispositifs d'ombrage peuvent offrir des économies d'énergie entre 8% et 20 % en fonction de la zone climatique avec un dimensionnement optimal de ces caractéristiques en prenant en compte les critères du confort thermique et visuel (Bellia et al., 2013 ; Grynning et al., 2014). Dans le cas contraire, par exemple un surdimensionnement des casquettes solaires, l'effet inverse peut se reproduire avec l'augmentation excessive des besoins de chauffage et d'éclairage.

#### 1.4.4 La ventilation

La ventilation permet de maintenir la qualité de l'air intérieur et d'éviter les dégradations du bâtiment. Ceci est effectué par l'évacuation de l'humidité et des polluants qui sont générés à la fois par l'activité humaine et par le bâtiment lui-même. Un débit d'air minimal doit être garanti pour une meilleure qualité de l'air intérieur dans le bâtiment en se référant à la norme NF EN 15251. Généralement, le renouvellement d'air peut être assuré d'une manière naturelle, mécanique ou hybride comme présenté ci-après.

#### 1.4.4.1 La ventilation naturelle

La ventilation naturelle est régie par des différences de pression lorsque l'air s'écoule des zones de haute pression vers celles de basse pression suivant des mécanismes d'écoulement. Ces différences de pression peuvent être provoquées par l'effet de tirage thermique, par le vent ou par la combinaison des deux. Ces deux moteurs sont variables dans le temps et dépendent des caractéristiques du site (Allard, 1998).

Le vent soufflant sur le bâtiment induit des pressions positives sur les façades au vent (surpression), et des pressions négatives sur les façades sous le vent et sur le toit (dépression). En effet, la circulation de l'air dans un bâtiment se fait à travers les différentes ouvertures (défauts d'étanchéité, entrées d'air, débouché de conduite). La pression due au vent  $P_w$  dans ce cas s'écrit :

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times C_p \times v_{vent}^2 \quad \text{Eq.3}$$

Où  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] est la densité de l'air,  $v_{vent}$  est la vitesse du vent et  $C_p$  [Sans dimension] est le coefficient de pression du au vent. Pour connaître la valeur exacte de ce coefficient, il faut réaliser des expérimentations en soufflerie, si non des valeurs standard ont été définies dans la littérature dont une compilation a été faite par l'AIVC (Orme et al., 1998).

Le tirage thermique résulte de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Ce qui engendre une différence de densité de l'air résultant d'un gradient de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment ce qui donne lieu à la circulation de l'air à l'intérieur du logement. Sachant que typiquement, l'air dans le bâtiment passe par le niveau bas et ressort par le niveau haut, une zone neutre apparaît et donc la différence de pression est nulle. La mise en équation dans ce cas se base sur la loi d'hydrostatique :

$$P_z = P_0 - \rho \times g \times z \quad \text{Eq.4}$$

$$\Delta P_{int-ext} = P_{0int} - P_{0ext} + (\rho_{ext} - \rho_{int}) \times g \times z \quad \text{Eq.5}$$

La Figure 1-21 illustre l'effet combiné du vent et du tirage thermique. La formulation physique de la différence de pression totale due à ce phénomène s'écrit comme suit :

$$\Delta P_{int-ext} = P_{0int} - P_{0ext} + (\rho_{ext} - \rho_{int}) \times g \times z - P_w \quad \text{Eq.6}$$

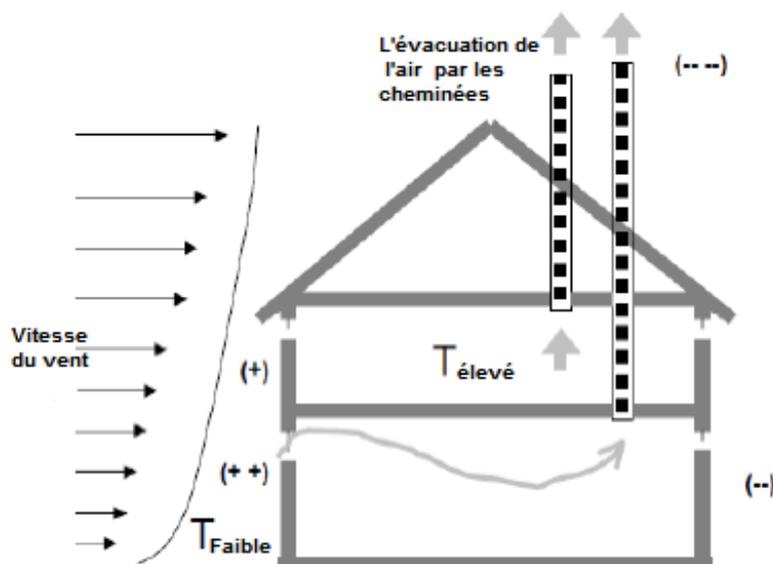


Figure 1-21 : Effets combinés du vent et du tirage thermique (Russell et al., 2007).

Le renouvellement d'air naturel régi par les défauts d'étanchéité et/ou par les différentes ouvertures de l'enveloppe. Dans notre étude, on s'intéressera plutôt à la modélisation aéraulique des défauts d'étanchéité à l'air et de l'ouverture des fenêtres pour la ventilation naturelle en été.

**a) Modélisation des petites ouvertures (les défauts d'étanchéité) :**

Les défauts d'étanchéité à l'air (ou infiltration d'air) causent généralement des écoulements aérauliques parasites lorsqu'il y a une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (Figure 1-22). Ils peuvent être caractérisés par des petits orifices avec un débit d'air qui les traverse.

L'expression du débit théorique à travers un orifice de section A selon l'équation de Bernouilli s'écrit :

$$\dot{m}_t = \rho \times A \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}} \tag{Eq.7}$$

En réalité, l'écoulement est évidemment affecté par les caractéristiques géométriques de l'orifice. Pour une configuration géométrique simple, il est possible d'introduire le coefficient de décharge  $C_d$ , qui permet de relier le débit théorique et réel traversant l'orifice, on peut écrire donc :

$$\dot{m} = C_d \times \rho \times A \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}} \tag{Eq.8}$$

En outre, il apparaît que pour des fuites ou des ouvertures de géométrie complexe, la dépendance de la différence de pression est d'autant plus compliquée. Par conséquent, une fonction empirique de loi de puissance est généralement considérée:

$$\dot{m} = K \times \Delta P^n \quad \text{Eq.9}$$

L'exposant n varie entre 0,5 pour les écoulements turbulents et 1 pour les écoulements laminaires. Le coefficient K inclut les caractéristiques géométriques de l'orifice. Il peut être interprété physiquement comme le débit induit par une chute de pression unitaire.

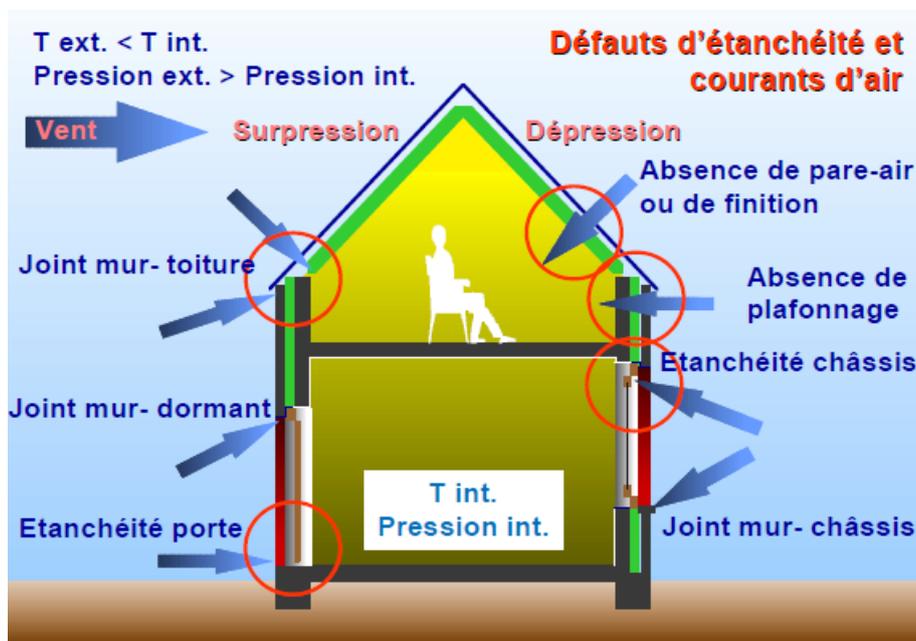


Figure 1-22 : Les défauts d'étanchéité des bâtiments sources de courants d'air inconfortables (Liébard, Herde, 2006).

Des valeurs limites du taux d'infiltration d'air sont exigées par plusieurs réglementations et labels dans le monde (Tableau 1-14).

Des simulations sur un grand nombre de types de bâtiments dans des climats différents ont montré que la réduction des fuites d'air peut économiser de 5% jusqu'à 40% des besoins de chauffage et de refroidissement pour les bâtiments neufs (Jokisalo et al., 2009 ; Doodoo et al., 2014) et aussi pour l'existant (Nabinger, Persily, 2011).

Tableau 1-14 : Les exigences sur le taux d'infiltration d'air dans l'Union européenne, les États-Unis et les programmes de logement avancés.

	Union européenne sans ventilation (code)	Union européenne avec ventilation (code)	Etats unis pour le résidentiel (code)	Label Passivhaus pour le résidentiel	Bâtiment ancien avec beaucoup de fuite	Bâtiment très étanche à l'air avec ventilation
Les infiltrations d'air à 50 Pa (v/h)	2,5 à 3	0,6 à 1	≤ 3.0 pour le climat froid ≤ 5.0 pour le climat chaud	≤ 0.6	10 à 20	0,2

**b) Modélisation des grandes ouvertures verticales**

Concernant les grandes ouvertures verticales (exemple des fenêtres et des portes dans le bâtiment), le débit d'air s'écrit alors dans ce cas (Allard, 1998):

$$\dot{m}_{0,Zn} = C_d \times \frac{W}{3} \times (8 \times g \times H^3 \times \rho'_i \times \Delta\rho)^{0.5} \quad \text{Eq.10}$$

Avec :

$$\rho'_i = \frac{\rho_i}{\left[1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^3}$$

La ventilation naturelle doit être utilisée avec précaution en fonction du climat et la taille des ouvertures. En 2009, Koffi a montré que le choix de ce système de ventilation est plus déperditif qu'une ventilation mécanique simple flux (+18,5% de déperditions) (Koffi, 2009).

**1.4.4.2 La ventilation mécanique**

La ventilation mécanique contrôlée permet l'aspiration d'air extérieur à travers des entrées d'air et le rejet de l'air intérieur. Ceci est effectué de façon régulière et modulable à l'aide d'un ou plusieurs ventilateurs, afin d'assurer un renouvellement d'air suffisant et maîtrisé.

La puissance consommée par ces ventilateurs et ces auxiliaires varie en fonction du débit, du rendement, des pertes de charges et du temps de l'utilisation des ventilateurs. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{Q}_{vent} = \frac{\dot{m}_{tot} \times \Delta p_{ventil} \times t}{\eta_{tot} \times 3600} \quad \text{Eq.11}$$

$\dot{Q}_{vent}$  : Consommation énergétique du ventilateur (W)

$\Delta p_{ventil}$  : Perte de charge (Pa)

$\dot{m}_{tot}$  : Débit d'air de la ventilation mécanique (m<sup>3</sup>/h)

$\eta_{tot}$  : Rendement total du ventilateur.

$t$  : Durée de fonctionnement (h)

**c) Ventilation mécanique simple flux:**

La ventilation mécanique simple flux est un système simple à employer. Il suffit de mettre des entrées d'air fixes ou auto réglables dans les pièces de vie (salle de séjour, chambres) pour que l'air circule à l'intérieur du bâtiment et qui sort par les bouches d'extraction situées dans les pièces humides (cuisine, salle de bain, WC), où l'air vicié est extrait vers l'extérieur à l'aide d'un ventilateur (Figure 1-23).

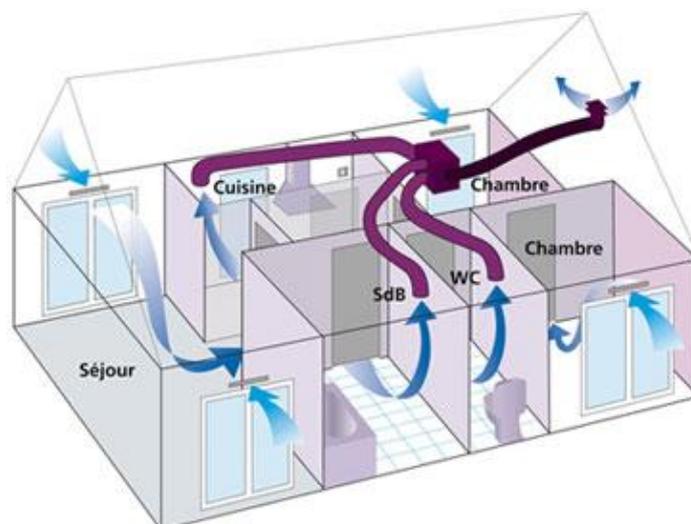


Figure 1-23 : Exemple d'une maison équipée par une ventilation mécanique simple flux (Haut, 2011).

d) Ventilation mécanique double flux:

La VMC double flux permet ainsi une meilleure maîtrise des débits insufflés et extraits, qui peuvent être modulés. Ce système permet la récupération de chaleur sur l'air extrait ce qui limite la pénétration de l'air froid sur le soufflage d'air neuf, et minimise les déperditions thermiques par ventilation en hiver. En été, et parfois en demi-saison, un by-pass peut être utilisé pour empêcher la récupération de chaleur dans l'échangeur et donc bénéficier d'un air plus frais si la température est plus faible (Figure 1-24). L'efficacité de récupération de chaleur ou rendement dans ce type de ventilation s'écrit :

$$\eta_{vmc} = \frac{T_s - T_{ext}}{T_r - T_{ext}} \quad \text{Eq.12}$$

Avec :

$T_s$  : Température de l'air soufflé

$T_{ext}$  : Température extérieure

$T_r$  : Température de l'air repris (air vicié)

Ce rendement varie entre 50% et 95% (Juodis, 2006 ; Mardiana-Idayu, Riffat, 2012 ; Garbay, 2011) et donc un taux de réduction des déperditions par renouvellement d'air de l'ordre de 50% à 95% par rapport à une ventilation simple flux.

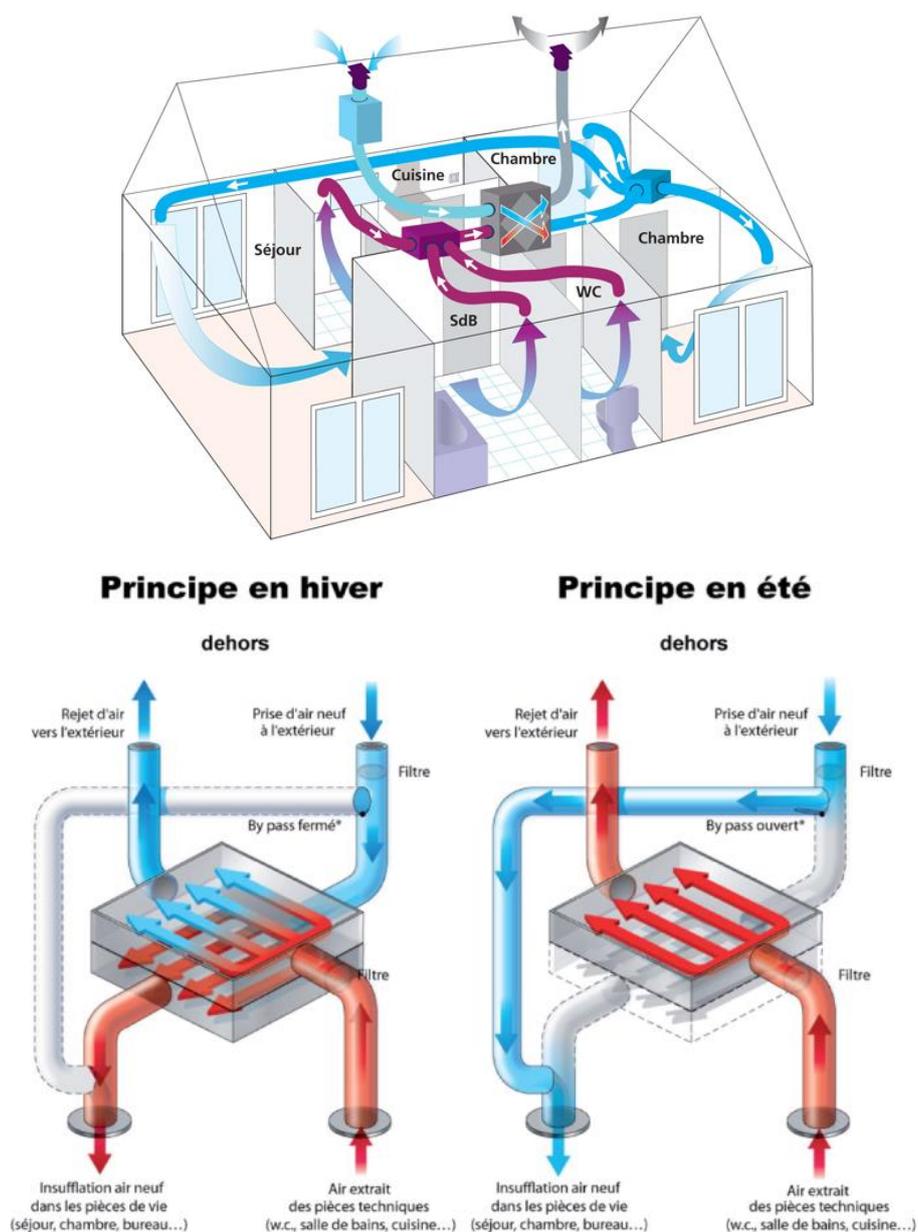


Figure 1-24 : Exemple d’une maison équipée par une ventilation mécanique double flux et le schéma de l’échangeur de chaleur.

### 1.4.4.3 La ventilation hybride

La ventilation hybride est un nouveau concept de ventilation qui utilise et combine les meilleures caractéristiques des systèmes naturels et mécaniques de ventilation. Ceci permet de réduire la consommation énergétique des ventilations mécaniques lorsque la ventilation naturelle s’avère suffisante et donc fournir une bonne qualité des ambiances intérieures (Santamouris, Wouters, 2006). Des études ont montré que ce système permet de réaliser des économies d’énergie de 30 à 35 % par rapport à une VMC (Ji et al., 2009).

En effet, ce type de ventilation est économe par rapport aux VMC mais par contre il est plus compliqué à mettre en place (détails techniques, volumineux...), plus coûteux en investissement et ne prend pas en considération la déshumidification.

#### 1.4.4.4 Puits climatique

Le principe d'un puits climatique consiste à ventiler mécaniquement de l'air via des tubes horizontaux enterrés afin de récupérer (en hiver) ou dissiper (en été) la chaleur du sol. Ce dernier est à une température moyenne inférieure à celle de l'extérieur en été et supérieure à celle-ci en hiver. La Figure 1-25 montre le principe de fonctionnement d'un puits climatique pour la ventilation d'une maison individuelle.

Des études ont été réalisées en comparant la ventilation mécanique simple et double flux pour l'évaluation des performances énergétiques d'une maison individuelle standard dans trois villes en France en utilisant le principe d'un puits climatique. Il a été constaté que la ventilation double flux avec un échangeur de chaleur a 75% d'efficacité, réduit les consommations d'énergie finale de 22% pour le climat de Nancy, de 19% pour La Rochelle et de 16% pour Nice (Chlela et al., 2007). Cette réduction est surtout remarquable pendant la saison d'été où un grand potentiel pour le rafraîchissement de la maison a été constaté.

Une étude a été réalisée pour le cas d'une maison individuelle à Marrakech (Maroc) dans la période estivale a montré que la température de sortie du puits climatique varie entre 20 et 28,8 °C alors que la température extérieure est entre 30 et 44°C (Bouhess et al., 2013). Ce qui peut être très prometteur pour le rafraîchissement passif des bâtiments des régions chaudes du Maroc.



Figure 1-25 : Le principe de fonctionnement d'un puits climatique pour la ventilation d'une maison individuelle.

#### 1.4.4.5 Le free cooling

La ventilation intensive ou 'free cooling' est basée sur le principe de la sur-ventilation (mécanique ou naturelle) afin de refroidir un bâtiment par l'énergie gratuite de l'air extérieur lorsque celui-ci est à une température inférieure à celle de l'intérieure. En fonction du moment de la journée, on peut distinguer entre free cooling diurne et nocturne. Le free cooling nocturne fonctionne efficacement avec une inertie thermique élevée de l'enveloppe. Cependant, en parallèle de la restitution de la chaleur par l'enveloppe, la sur-ventilation permet son

évacuation. Evidemment, cette technique est utilisée sans avoir recours à l'utilisation des systèmes de conditionnement d'air.

A titre d'exemple, pour l'estimation du potentiel du free cooling par ventilation naturelle (Ghiaus, Allard, 2006) propose d'utiliser la notion de la température flottante par comparaison avec les températures limites du confort déterminées par la norme NF EN ISO 7730. La Figure 1-26 montre que le free cooling n'est possible que dans le cas où la température flottante  $T_{fr}$  est supérieure à celle de l'extérieur  $T_o$  qui est elle-même supérieure à la température limite supérieure du confort  $T_{cu}$ . Dans le cas contraire, un conditionnement d'air s'avère obligatoire. Les auteurs ont aussi montré que dans la région Nord Européen, le free cooling permettrait de couvrir plus de 50% des besoins de climatisation.

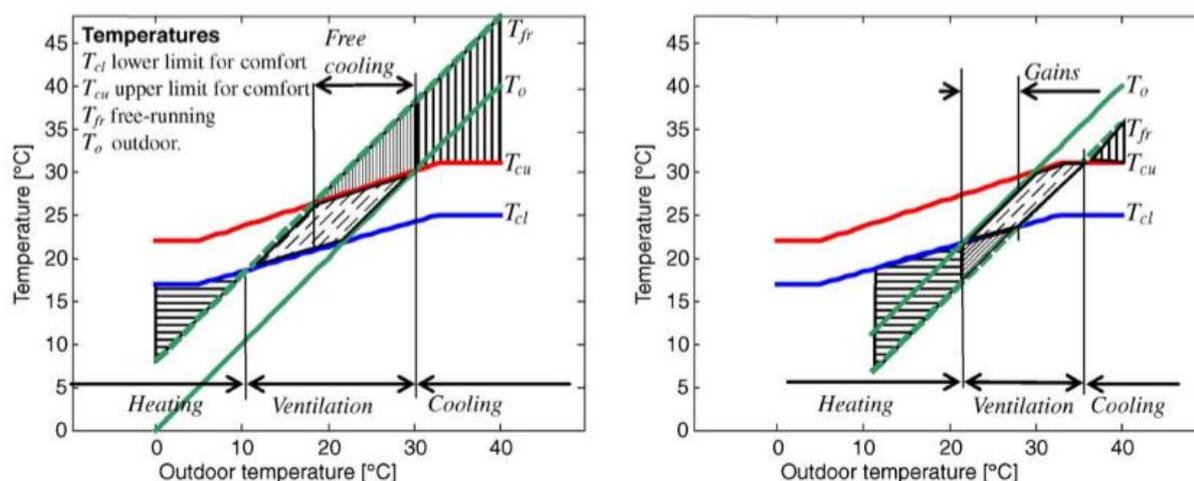


Figure 1-26 : La variation du chauffage, du free-cooling et de la climatisation lorsque la température flottante est (a) supérieur (b) inférieure à la température extérieure (Ghiaus, Allard, 2006)

### 1.4.5 L'éclairage

L'amélioration des performances de l'éclairage est devenue l'un des axes prioritaires pour la transition énergétique car il est celui qui présente le taux de retour sur investissement le plus rapide estimé entre 3 et 5 ans (20 ans pour l'isolation) dans les cas favorables (afe, 2013).

Afin de réduire la consommation d'électricité due à l'éclairage artificiel, d'une part, il va falloir réaliser une bonne gestion technique en fonction de l'éclairage naturel. Ceci peut être effectué via des modes de gestion de l'éclairage artificiel (interrupteur, capteur de présence, gradateur...). D'autre part, il faut choisir les lampes les plus efficaces en luminosité mais aussi avec moins de consommation. Le Tableau 1-15 présente une comparaison entre différents types de lampes.

Tableau 1-15 : Les caractéristiques des différentes lampes (ADEREE, 2015a).

Type de lampe	Puissance (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité lumineuse (lm/W)	Durée de vie (h)
Lampes à incandescence	25 -100	200 - 1900	5 - 19	1000

classique				
Lampes à incandescence halogènes	5 - 500	50 - 100000	10 - 12	2000 - 5000
Tubes fluorescents	15 - 58	1300 - 5000	60 - 105	8000 - 12000
Lampes économiques ou lampes fluocompactes (CFL)- ballast Intégré	3 - 23	100 - 6000	35 - 80	6000 - 10000
Lampes économiques ou lampes fluocompactes (CFL)- ballast externe	5 - 80			8000 - 16000
Diodes électroluminescentes (DEL)	0,007 - 15	1,5 - 400	20 - 30	5000 - 100000

#### 1.4.5.1 La production d'énergie dans le bâtiment

La production d'énergie dans les bâtiments est réalisée via des systèmes qui utilisent principalement des ressources énergétiques fossiles et/ou renouvelables. Plusieurs systèmes existent dans l'industrie. Certains ne produisent que de l'énergie nécessaire au chauffage et/ou à la production de l'eau chaude sanitaire comme les panneaux solaires, le bois-énergie, les chaudières, alors que les pompes à chaleur permettent le conditionnement de l'air (chauffage et refroidissement). D'autres systèmes sont spécifiques pour la production de l'électricité à partir des capteurs solaires photovoltaïques ou des éoliennes. On trouve aussi les unités compactes qui permettent de chauffer ou de refroidir, et purifier l'air provenant de l'extérieur tout en assurant un débit de ventilation hygiénique. Des technologies nouvelles sont en cours d'évaluation comme la cogénération qui consiste à produire simultanément de l'électricité et de la chaleur. Dans la partie suivante nous nous intéressons à quelques-uns de ces systèmes les plus fréquemment utilisés dans le bâtiment.

#### 1.4.5.2 Les Chaudières

Le principe des chaudières est basé sur la conversion des combustibles fossiles en chaleur par un brûleur ou par un foyer de combustion. Cette chaleur est transmise par le biais d'un échangeur à un fluide caloporteur qui transmet à son tour la chaleur à la distribution.

La performance énergétique d'une chaudière est exprimée par son rendement calorifique, défini comme étant le rapport de l'énergie utile fournie par la chaudière et du pouvoir calorifique total du combustible consommé. Dans le cas d'une chaudière à eau chaude, le rendement instantané peut être exprimé comme suit :

$$\eta = \frac{\dot{m} \times C_p \times (T_s - T_e)}{Q_{fuel} \times PCI} \quad \text{Eq.13}$$

Avec :

$\dot{m}$ : Débit massique de l'eau chauffée [kg/h]

$C_p$ : Capacité calorifique de l'eau chauffée [kJ/°C.kg]

$T_e$  : Température d'entrée de l'eau chauffée [°C]

$T_s$  : Température de sortie de l'eau chauffée [°C]

$Q_{fuel}$ : Débit massique du fuel [kg/h]

$PCI$  : Pouvoir calorifique inférieur [kJ/kg]. Avec la condensation de l'eau, on peut passer au pouvoir calorifique supérieur (PCS) soit  $PCS = PCI + \text{chaleur de vaporisation de l'eau}$ .

Le rendement global des chaudières varie généralement entre 46% dans le cas des anciennes chaudières surdimensionnées avec longue boucle de distribution et 82% dans le cas des chaudières à haut rendement (courte boucle de distribution, radiateurs isolés au dos, régulation par sonde extérieure, vannes thermostatiques, ...).

### 1.4.5.3 Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) est une machine thermique permettant de puiser de la chaleur à basse température d'un milieu ambiant (air, sol, eau,...) à l'aide d'un fluide caloporteur, pour la restituer au bâtiment pour le chauffage et/ou le refroidissement.

Le principe d'une PAC est de compresser un gaz qui s'échauffe et cède sa chaleur en se condensant. Ce liquide est détendu dans une vanne de détente et il est ensuite évaporé par l'évaporateur.

L'efficacité d'une pompe à chaleur est donnée par son coefficient de performance COP pour le mode chaud et EER pour le mode froid. Ce coefficient est le rapport de l'énergie utile sur la quantité d'énergie délivrée. En fonction du type de PAC, le Tableau 1-16 présente les valeurs minimales et maximales réglementaire du COP et de l'EER au Maroc et en France.

Tableau 1-16 : L'intervalle de variation du coefficient de performance du PAC.

	COP		EER	
	Min	Max	Min	Max
<b>Bâtiment neuf au Maroc</b>	3	7	2,6	7
<b>Réhabilitation en France</b>	2,7	7	2,6	7

### 1.4.5.4 Systèmes solaires

L'énergie solaire renouvelable, gratuite et disponible (éventuellement dans le bassin méditerranéen) peut être utilisée d'une manière passive via l'enveloppe mais aussi via des systèmes qu'on appelle 'le volet actif'. Pour prédire l'énergie produite par un panneau solaire, il faut connaître l'orientation, l'inclinaison, le positionnement du masque solaire et le rendement du système.

Nous présentons dans ce qui suit les principaux systèmes qui existent dans le marché.

#### a) Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI)

C'est le système le plus simple pour produire l'énergie via les rayonnements solaires. Il comprend des capteurs solaires et un ballon de stockage. La circulation du liquide caloporteur

chauffé par le capteur solaire, transfère sa chaleur à l'eau d'un ballon de stockage via un échangeur. Des suppléments peuvent être intégrés au le système comme le régulateur, la pompe de circulation et le dispositif de chauffage d'appoint.

b)  Systèmes Solaires Combinés (SSC) :

En plus de la production de l'eau chaude sanitaire par le même principe qu'un CESI, le SSC permet aussi la production du chauffage pour le bâtiment. Parmi ces systèmes, on trouve en particulier les systèmes dits 'Planchers Solaires Directs' (PSD). Le principe de fonctionnement est relativement simple. Après que le fluide caloporteur soit chauffé par les capteurs solaires, il est acheminé et passe par des tuyaux situés dans une dalle de plancher. En l'occurrence, la dalle joue un rôle important avec son inertie thermique car elle permet le stockage et la restitution de la chaleur dans le local. Si l'ensoleillement est insuffisant, des thermostats d'ambiance déclenchent le réseau d'appoint (l'utilisation d'une chaudière par exemple).

c)  La climatisation solaire :

Comme le nom l'indique, cette technique consiste à transformer l'énergie solaire pour la production du froid permettant d'assurer le rafraîchissement des locaux. En théorie, il existe quatre types de système de climatisation solaire :

- L'utilisation de l'énergie solaire thermique pour alimenter une machine à froid via le principe d'absorption ou adsorption.
- L'utilisation de l'énergie solaire thermique pour alimenter un système de conditionnement d'air par évaporation ou DEC (Dessicant Evaporative Cooling).
- Convertir l'énergie solaire thermique en énergie mécanique couplée avec un climatiseur à compression.
- L'utilisation des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité afin d'alimenter une climatisation traditionnelle.

Actuellement, les systèmes de climatisation solaire les plus répandus sont les systèmes à absorption. Ce dispositif dissocie par ébullition une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit, par absorption de chaleur, du froid qui est distribué dans un système de climatisation classique dans le bâtiment (Desmons, 2014).

En général, le rendement d'un panneau solaire thermique est défini comme étant le rapport entre la puissance utile que l'on peut récupérer d'un capteur solaire et la puissance incidente (par le rayonnement solaire). Il s'écrit donc comme suit (Amet et al., 2010) :

$$\eta = \alpha\tau - K \frac{(T_m - T_{ext})}{E} \quad \text{Eq.14}$$

$\eta$  : Rendement du capteur

$\alpha$  : Facteur d'absorption de l'absorbeur.

$\tau$  : Facteur de transmission du vitrage.

$K$  : Coefficient de déperdition thermique du capteur.

$T_m$  : Température moyenne du capteur (approximée par la moyenne entre les températures d'entrée et de sortie de capteur) (en °C).

$T_{ext}$  : Température extérieure (en °C)

d) Le panneau solaire photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques permettent de transformer la lumière du rayonnement solaire en énergie électrique par l'utilisation des matériaux semi-conducteurs comme le silicium cristallin. Typiquement, un panneau de 0,5 m<sup>2</sup>, avec trente-six cellules de 100 cm<sup>2</sup>, produit 60 watts-crête sous 15 V lorsqu'il est exposé à 1000 W/m<sup>2</sup> (Labouret et al., 2010). Dans le secteur du bâtiment, la production de l'électricité par le photovoltaïque est utilisée pour répondre aux besoins électriques. Dans le cas d'un excès d'énergie ou s'il s'agit d'un surdimensionnement, cette énergie peut être renvoyée sur le réseau public. Le rendement de ce type de capteur est défini comme le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par celui-ci. Il s'écrit par la formule suivante :

$$\eta = \frac{P_m}{E \times S} \quad \text{Eq.15}$$

$\eta$  : Rendement du panneau photovoltaïque

$P_m$  : La puissance crête est définie comme la puissance électrique produite par la cellule (ou un panneau) lorsqu'elle est soumise aux conditions STC (1 000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, spectre solaire AM 1,5) (W).

$E$  : Eclairement lumineux (W/m<sup>2</sup>)

$S$  : Surface du photovoltaïque (m<sup>2</sup>).

Généralement, le rendement d'un panneau solaire thermique ou photovoltaïque varie entre 8% et 30%.

#### 1.4.5.5 Éolienne urbaine intégrée au bâtiment

Une éolienne est un système qui permet de produire de l'énergie électrique par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie fournie par la force du vent fait tourner ce qu'on appelle les pâles par l'intermédiaire d'une génératrice qui est en fait un alternateur de courant continu (Figure 1-27). L'énergie électrique ainsi produite peut être consommée localement, ou injectée dans le réseau électrique.

En milieu urbain, le vent est plus faible et surtout plus turbulent qu'en terrain ouvert (variations rapides de vitesse et de direction du flux d'air). En l'occurrence, des petites éoliennes (éoliennes domestiques) peuvent être installées à l'entourage ou intégrées au bâtiment. Elles peuvent produire jusqu'à 20 kW.

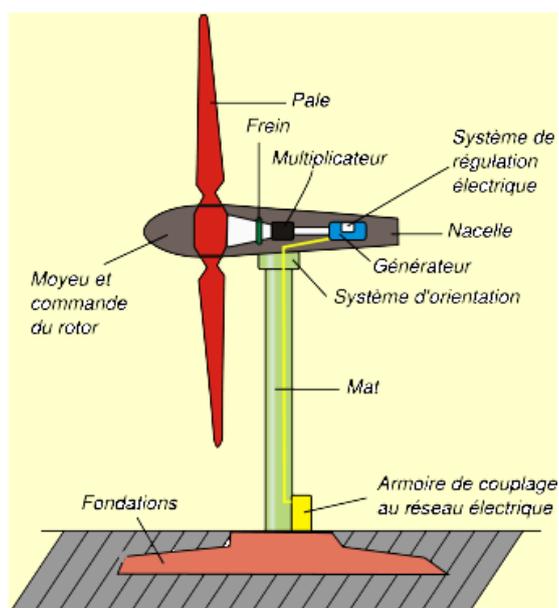


Figure 1-27 : Schéma d'une éolienne

L'installation d'une éolienne nécessite une étude préalable de la vitesse du vent et les impacts qu'elle peut avoir sur son environnement. Pour faire marcher une éolienne la vitesse minimale ne doit pas être inférieure à 3 m/s, et cette vitesse ne doit pas dépasser généralement 20 m/s pour que le système ne soit pas endommagé.

Le rendement moyen global de l'éolienne est défini comme étant le rapport de l'énergie électrique produite sur l'énergie du vent disponible). On trouve typiquement, un rendement moyen de 20 % pour les petites éoliennes.

### 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte énergétique, économique et environnemental à l'échelle mondiale, régionale (La méditerranée), française et marocaine.

Nous avons constaté que la situation est très critique dans le secteur du bâtiment (Figure 1-28). Dans ce secteur, la priorité est donnée pour la conception des bâtiments neufs au Maroc et pour la réhabilitation de l'existant en France.

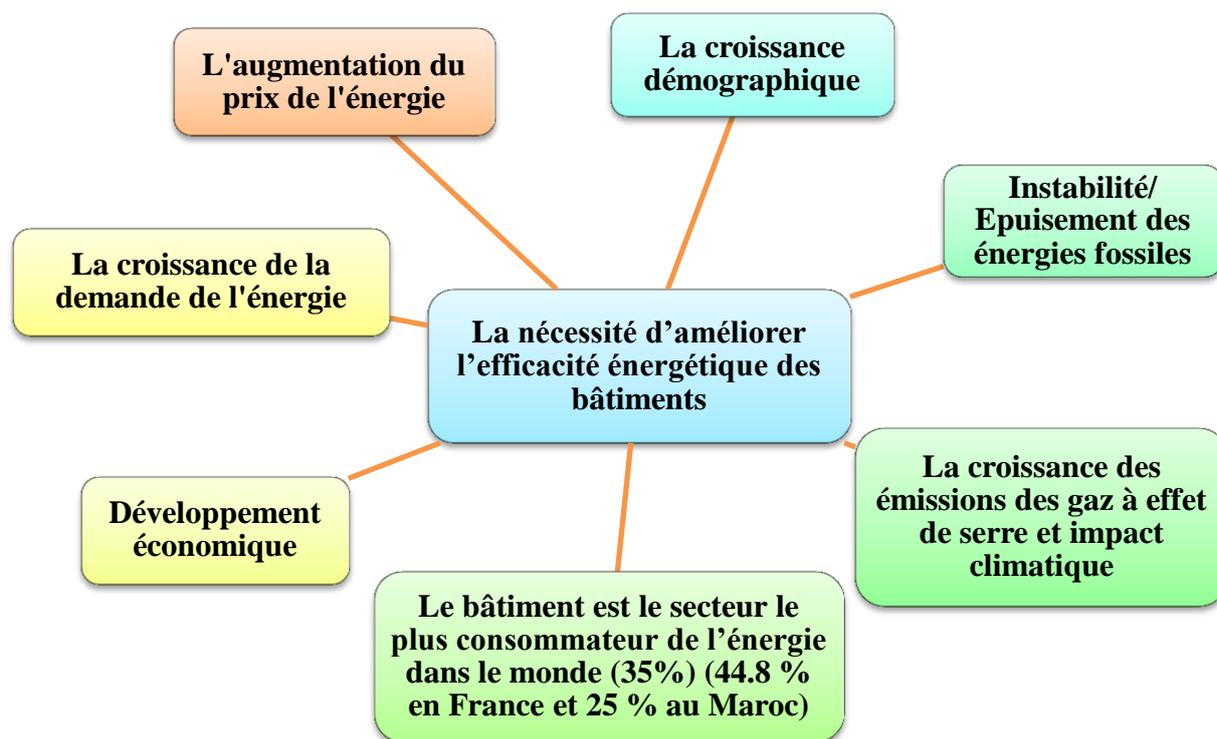


Figure 1-28 : Les différents enjeux dans le secteur du bâtiment.

Afin de remédier à ces problèmes, des projets de lois et de réglementations ont été mis en œuvre par plusieurs pays de la méditerranée, notamment la réglementation thermique RT 2012 et de l'existant en France et pour le bâtiment neuf au Maroc. De façon à ne pas limiter notre réflexion aux cadres réglementaires et afin de favoriser la construction des bâtiments de très basse consommation voir à énergie positive, nous avons présenté les différents labels et certifications qui proposent la mise en œuvre des solutions techniques performantes.

L'étude de paramétrage du bâtiment et ces systèmes a permis d'identifier les intervalles de variation de chaque paramètre ayant une influence significative sur le comportement énergétique du bâtiment.

Nous pouvons conclure ici qu'une analyse multicritères doit donc être réalisée pour la construction des bâtiments durables, économes en énergie, respectueux de l'environnement et avec le moindre coût.

Les maitres d'ouvrages, les bureaux d'études et les architectes seront face à un véritable défi surtout du fait du nombre important de paramètres et de critères à prendre en considération. Il va falloir donc développer une méthode d'aide à la décision multicritère qui permette de leur faciliter la tâche pour effectuer des choix optimaux. La présentation de notre démarche fait l'objet du chapitre suivant.

---

## **Chapitre . 2 : Méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception ou la réhabilitation énergétique des bâtiments**

---

## 2.1 Introduction

Comme mentionnée dans le chapitre précédent, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est urgente et doit prendre en compte des critères économiques, environnementaux et sociaux. Durant la phase d'étude d'un projet de bâtiment, des études paramétriques doivent être réalisées afin de mettre en évidence les solutions optimales permettant d'atteindre ces objectifs.

Pour une construction ou une réhabilitation durable, il va falloir trouver des solutions efficaces en prenant en compte tout le cycle de vie d'un bâtiment, c'est-à-dire depuis sa fabrication jusqu'à sa fin de vie, ce qui permet une gestion raisonnable des ressources et des impacts. Vu le nombre important de paramètres à prendre en considération pour la réalisation de cette étude, un choix optimal parmi les nombreuses solutions possibles s'avère être un problème très complexe. Il va falloir donc développer des méthodes d'aide multicritère à la décision avec un temps de calcul rapide pour guider les concepteurs et les décideurs des projets de bâtiment à prendre des décisions rationnelles.

## 2.1 Problématique d'aide à la décision multicritère

### 2.2.1 Définition d'un problème d'aide à la décision

Par définition, l'aide à la décision est l'ensemble des techniques permettant de faire le meilleur choix possible parmi les différentes solutions existantes selon des critères prédéfinis. Ces approches peuvent être classées comme étant des outils de soutien pour les décideurs, car elles parviennent à filtrer les meilleures solutions possibles et montrer les avantages et les inconvénients associés à chacune d'elles. Généralement, une méthode d'aide à la décision inclut les étapes suivantes (Recchia et al., 2011 ; Zopounidis, Pardalos, 2010):

- L'identification du problème ;
- L'identification et la définition des variables d'étude ;
- La définition des objectifs;
- La résolution de la nature contradictoire des différents critères (par exemple le confort intérieur et les besoins énergétiques, la consommation d'énergie et les coûts d'investissement, etc.) ;
- L'identification des solutions compromis et l'analyse des conséquences des solutions ;
- La discussion et l'analyse des résultats obtenus ;
- L'aide à la prise de décision.

### 2.2.2 Formulation d'un problème d'aide à la décision

La formulation d'un problème d'aide à la décision est définie par l'espace de recherche, l'espace des objectifs et la relation entre les deux. L'espace de recherche représente l'ensemble des solutions possibles qui sont définies à partir des intervalles de variation des paramètres intrinsèques du problème. Le nombre et la nature des variables (continues et/ou discrètes) déterminent la dimension et la nature de cette espace.

L'espace des objectifs est caractérisé par les critères de décision. Ces derniers sont définis comme des fonctions mathématiques permettant d'évaluer quantitativement ou qualitativement les performances des solutions du problème. La dimension de cet espace dépend du nombre des critères de décision.

La Figure 2-1 représente l'espace de recherche et l'espace des objectifs d'un problème à trois objectifs et dont les solutions sont caractérisées par trois variables. Une solution  $x$  du problème est donc définie à partir des valeurs prises par les trois variables  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$ . Cette solution est évaluée à partir des critères de décision  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  et donc déterminer un point unique  $z$  dans l'espace des objectifs.

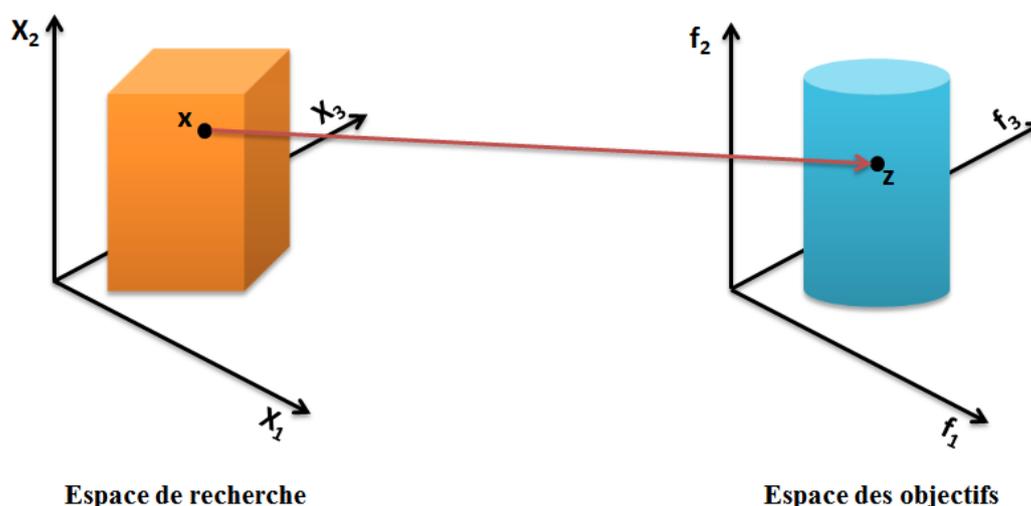


Figure 2-1. Représentation de l'espace de recherche et l'espace des objectifs correspondant à un problème à trois paramètres et trois fonctions objectifs.

Dans le domaine de l'énergétique du bâtiment, l'espace de recherche est déterminé par les variables d'études qui peuvent être des paramètres liés à l'enveloppe et/ou à des systèmes de ventilation ou de production de l'énergie. Alors que les critères sont à définir par les décideurs. Comme nous l'avons dit précédemment pour la conception d'un bâtiment durable, les critères économiques, sociaux et environnementaux doivent être pris en considération. La relation entre les deux espaces fait appel aux méthodes et outils de prédiction du comportement énergétique du bâtiment ainsi qu'aux calculs économiques et environnementaux.

## 2.2 Modélisation énergétique et analyse de cycle de vie du bâtiment

### 2.3.1 Variables d'étude

La construction des bâtiments à faible consommation énergétique se fait par la réalisation d'une conception passive ou active via l'intégration des systèmes de production d'énergie. Le choix des paramètres d'étude pour l'optimisation des bâtiments est un sujet de débat scientifique. Nous avons sélectionné pour le cas de notre étude, les variables qui s'avèrent être les plus influentes sur les performances énergétiques du bâtiment (Tableau 2-1). Il est à noter que la masse de l'enveloppe n'est pas considérée comme variable dans notre étude. Ce choix est justifié, car les matériaux de structure dans le cas de la conception des bâtiments neufs au Maroc sont souvent les mêmes et que dans le cas de la réhabilitation des bâtiments existants en France, généralement la structure porteuse du bâtiment subit rarement des modifications.

Tableau 2-1 : Les paramètres d'études sélectionnées pour l'optimisation énergétique du bâtiment.

Stratégie	Elément	Description	Variable	Symbole
Renforcement de l'enveloppe	Murs extérieurs	Isolation thermique injectée dans les lames d'air ou par l'intérieur ou par l'extérieur	Coefficient de transmission des murs	$U_m$
		Peinture adéquate	Coefficient d'absorption extérieur des murs	$\alpha_m$
	Toiture	Isolation thermique de la toiture par l'intérieur ou par l'extérieur	Coefficient de transmission de la toiture	$U_t$
		Peinture adéquate	Coefficient d'absorption extérieur de la toiture	$\alpha_t$
	Plancher	Isolation thermique du plancher en sous face ou pose d'isolant rigide sous chape	Coefficient de transmission du plancher	$U_p$
	Vitrage	Utilisation des vitrages à haute performance Pose de volets isolants Contrôle solaire	Coefficient de transmission du vitrage	$U_w$
			Facteur solaire	$FS$
	Cadre de la fenêtre	Utilisation d'une menuiserie performante	Coefficient de transmission du cadre	$U_f$
		Peinture adéquate	Coefficient d'absorption extérieur du cadre	$\alpha_c$
	Façade	Contrôle d'étanchéité à l'air de l'enveloppe (jointements, bandes adhésives d'étanchéité).	Débit d'infiltration d'air	$q_{inf}$
Parois opaques	Ponts thermiques	Coefficient de transmission linéique	$\psi$	
Amélioration des systèmes de ventilation	Ventilation	Surventilation nocturne	Débit de surventilation nocturne	$q_{survent}$
		Système à récupération de chaleur sur l'air extrait (ventilation double flux), ou ventilation hygroréglable	Rendement de la ventilation mécanique	$\eta_{vent}$

La nature de ces paramètres peut être continue ou discrète. L'utilisation des paramètres discrets rend le problème non convexe et discontinu et conduit donc à plus de difficulté en terme de résolution mathématique (Hemker et al., 2008). Le temps de calcul et le stockage des données augmentent exponentiellement quand le nombre de paramètres discrets augmente. Il est donc généralement recommandé d'éviter l'utilisation des variables discrètes dans l'optimisation (Nguyen et al., 2014).

## **2.3.2 Critères d'aide à la décision**

### **2.3.2.1 Indicateurs énergétiques**

#### **2.3.2.1.1 Consommation de chauffage et de refroidissement**

Pour connaître les performances énergétiques d'un bâtiment, il est nécessaire d'établir un bilan thermique du local. Ce bilan doit prendre en considération les déperditions par conduction, convection, rayonnement à travers l'enveloppe du bâtiment, par renouvellement d'air ainsi que les apports solaires et les charges internes (produites par les occupants, l'éclairage...). Ce bilan permet de calculer les besoins énergétiques de chauffage et de refroidissement. Ces besoins représentent la différence entre les déperditions et les gains thermiques.

Dans le cas des bâtiments équipés de systèmes de production d'énergie, on utilise le terme de 'consommation énergétique'. Cette dernière est définie comme étant le rapport entre les besoins énergétiques et le rendement global du système utilisé.

Il existe principalement deux classes d'outils de simulation pour le calcul du bilan thermique d'un bâtiment :

- Les outils simplifiés qui sont basés sur des modèles analytiques prenant en compte les phénomènes physiques simples (la conduction) et introduisant des facteurs de corrélation pour les aspects dynamiques.
- Les outils de Simulation Thermique Dynamique (STD) utilisent des modèles aux éléments finis, aux volumes finis ou aux différences finies ainsi que le calcul par la méthode des fonctions de transfert en intégrant des modélisations pour l'ensemble des principes physiques régissant les transferts de chaleur (Joe Clarke, 2001)(Joe A. Clarke, 2001)[94][94][94]. Les résultats obtenus en quelques secondes à quelques minutes sont plus précis et plus détaillés. La simulation intègre les apports solaires, les apports internes, les échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement ainsi que les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur, en prenant en compte l'inertie thermique des différentes zones. De nombreux outils de simulation thermique dynamique existent pour évaluer les besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments : TRNSYS, DOE-2, EnergyPlus, SERIRES, ESP-r, SPARK, COMFIE, CoDyBa, etc.

Dans les travaux de cette thèse, nous choisissons TRNSYS (S.A Klein, al, 2010) qui est un logiciel de simulation thermique dynamique très performant. C'est un outil de référence au niveau mondial dans le domaine de la prédiction du comportement dynamique des bâtiments et des systèmes. L'atout principal de TRNSYS est sa modularité et son extensibilité : il est très facile d'y ajouter de nouveaux composants, des systèmes et des concepts énergétiques. Il est aussi possible de le coupler avec d'autres logiciels (Contam, Comis, Fluent...).

### 2.3.2.1.2 Besoins d'énergie finale et en énergie primaire

La consommation d'énergie finale sur les différents usages s'écrit donc comme suit :

$$B_{EF} = B_{CH} + B_{RF} \quad \text{Eq.16}$$

$B_{EF}$  : Besoins d'énergie finale

$B_{CH}$  : Besoins de chauffage

$B_{RF}$  : Besoins de refroidissement

Le calcul de la consommation d'énergie primaire peut être ensuite déduit en multipliant la consommation en énergie finale par le coefficient de conversion. Ce coefficient dépend de la nature de l'énergie primaire utilisée et aussi de chaque pays.

### 2.3.2.2 Indicateurs économiques et coût de cycle de vie

L'analyse économique et financière constitue un élément clé pour l'évaluation d'un projet de construction ou de réhabilitation d'un bâtiment. En effet, plusieurs indicateurs ont été proposés par la littérature.

La méthode la plus simple est le calcul du coût d'investissement. Dans ce cas il suffit de faire la somme des coûts associés aux différents composants mis en œuvre. Cet indicateur permettra au propriétaire ou l'investisseur d'avoir un premier constat sur les capitaux engagés (D'Cruz, Radford, 1987 ; Asadi et al., 2012).

Le coût de maintenance pendant la durée de vie de ces composants a été introduit dans le calcul par (Rosenfeld, Shohet, 1999). (Rey, 2004) a calculé le coût d'usage qui est définie comme étant le cout de la facture énergétique et le cout de la maintenance. Pour évaluer l'efficacité économique des mesures d'économie d'énergie, le coût d'économie d'énergie a été introduit par Meier (Meier, 1984). Ces indicateurs permettent d'évaluer les bénéfices économiques de la conception, sur la phase d'exploitation. Ils traduisent alors les intérêts d'acteurs variés, propriétaires ou occupants, potentiellement différents.

Afin de connaître la rentabilité d'un projet d'investissement, on peut utiliser la valeur actuelle nette (VAN). Elle est définie comme étant la somme des valeurs actualisées des coûts et des revenus des travaux dans une période de temps. Elle consiste à comparer les gains d'un projet à son investissement initial. Une valeur actualisée nette positive indique que l'investissement est rentable (Martinaitis et al., 2004 ; Malatji et al., 2013). Un autre indicateur pour connaître la rentabilité d'un projet est le temps de retour sur investissement. Il représente le rapport entre le coût d'investissement et les économies d'énergie. Il est également utilisé comme un indicateur de risque. En règle générale, un projet avec une période de récupération plus courte est généralement considéré comme moins risqué (Murray et al., 2014). Afin de tenir compte de la valeur temporelle de l'argent, le taux de rentabilité interne (TRI) des investissements peut être utilisé. Un projet d'investissement ne sera généralement retenu que si son TRI prévisible est suffisamment supérieur au taux bancaire, pour tenir compte notamment de la prime de risque propre au type de projet.

Enfin, l'analyse économique et financière peut être menée de manière plus globale sur le cycle de vie du bâtiment. C'est la façon la plus complète pour prendre des décisions d'investissement. Le coût global sur le cycle de vie est la somme des coûts d'investissements, du coût des consommations d'énergie en usage et des coûts liés au traitement en fin de vie des composants de bâtiment déposés et mis en œuvre (Wang et al., 2005 ; Rivallain, 2013).

Ces indicateurs permettent de réaliser des interprétations sur les performances économiques et financières d'un projet de construction ou de réhabilitation d'un bâtiment. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, après avoir respecté les exigences des labels, des aides financières peuvent être fournies par des organismes. En effet, le coût d'investissement peut être réduit. Il est aussi à noter que les budgets d'investissement sont souvent limités et donc des contraintes financières apparaissent surtout dans le coût d'investissement initial.

Trois indicateurs seront donc utilisés pour évaluer les performances économiques des stratégies de conception ou de réhabilitation étudiées :

- Le coût d'investissement initial :

$$C_{INV} = \sum_{phase} I(P_i) \quad \text{Eq.17}$$

- Le coût d'investissement sur le cycle de vie :

$$LCC = C_{INV} + C_{EXP,50ans} + C_{MCV} \quad \text{Eq.18}$$

- Le temps de retour sur investissement :

$$RSI = \frac{C_{INV}}{EE} \quad \text{Eq.19}$$

$I(P_i)$  : Coût d'investissement pour chaque phase  $P_i$  ;

$C_{INV}$  : Coût d'investissement;

$C_{EXP,50ans}$  : Coût des consommations énergétiques en usage sur une durée de 50 ans ;

$C_{MCV}$  : Coût de maintenance sur le cycle de vie des composants ;

$EE$  : Economie d'énergie.

Pour l'estimation des coûts des produits de construction, la main d'œuvre et la maintenance, nous utilisons la base de données du logiciel Cype (CYPE, 2015). Cette dernière contient des prix de plusieurs fournisseurs. Les prix sont classés en fonction de l'opération cible à savoir la construction des bâtiments neufs ou la réhabilitation de l'existant (pose et dépose).

### 2.3.2.3 Indicateurs environnementaux et analyse de cycle de vie

Afin de pouvoir progresser vers un usage raisonné de l'énergie, il est devenu indispensable d'identifier les dommages environnementaux. Lors de la construction ou la réhabilitation d'un

bâtiment et aussi pendant tout son cycle de vie, plusieurs impacts sur l'environnement peuvent être repérés. Des indices ont été utilisés dans la littérature pour l'évaluation de ces effets.

Afin de connaître l'équivalent CO<sub>2</sub> émis dans l'environnement, le potentiel du réchauffement global (PRG) est utilisé pour prédire les impacts relatifs des différents gaz sur le réchauffement climatique en se basant sur leurs propriétés radiatives et leurs durées de vie (Rey, 2004 ; Alanne, 2004). Un autre indice aussi important à évaluer est le potentiel d'acidification atmosphérique. Il représente l'augmentation de la quantité de substances acides dans l'atmosphère (Rey, 2004 ; Alanne et al., 2007). La consommation d'eau a été aussi introduite comme un indice d'impact environnemental par (Alanne et al., 2007 ; Martinelli et al., 2015).

Un indicateur important pour caractériser l'épuisement des ressources naturelles est la consommation cumulée d'exergie (Wang et al., 2005 ; Gonçalves et al., 2012). Elle est définie comme étant « le travail maximal théorique pouvant être extrait de l'ensemble formé par le système étudié et l'environnement quand le système passe d'un état donné à l'équilibre avec l'environnement » (Moran, 1990). Une évaluation des impacts environnementaux sur le cycle de vie de bâtiment a été réalisée par (Wang et al., 2005 ; Rivallain, 2013).

Dans notre étude nous utilisons la base de données INIES pour le calcul des impacts sur l'environnement (Inies, 2015). Elle met à disposition des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de produits de construction fournie par les fabricants ou syndicats professionnels. Ces fiches contiennent des informations issues d'un bilan environnemental sur l'ensemble du cycle de vie du produit depuis les phases de fabrication, de transport, de mise en œuvre, de vie en œuvre et de fin de vie. Il existe plus de 1560 FDES, consultables à partir du nom du produit, du nom de l'organisme responsable de la fiche, ou d'une nomenclature fonctionnelle des produits de construction propre à la base Inies. Ces déclarations objectives, qualitatives et quantitatives, délivrées selon un format standardisé sont destinées à aider les maîtres d'ouvrages, les concepteurs et les entreprises du bâtiment à évaluer la qualité environnementale de leurs projets de construction. Chaque FDES possède plusieurs indicateurs élaborés selon la norme NF P01-010. Ces derniers sont listés dans le Tableau 2-2. Ils seront utilisés pour l'évaluation du modèle de cycle de vie dans ce présent travail.

Tableau 2-2 : Indicateurs environnementaux utilisés dans la base de données INIES (issus de la norme NF P01-010).

Indicateurs d'impacts environnementaux	Unité	Symbole
Consommation cumulée d'énergie primaire	MJ	CCEP
Epuisement des ressources	kg Sb eq.	ER
Consommation d'eau	m <sup>3</sup>	CE
Déchets solides	Kg	DS
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq.	CC
Acidification atmosphérique	kg SO <sub>2</sub> eq.	AAT
Pollution de l'air	m <sup>3</sup> d'air	POA
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup> d'eau	POE
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC-11 eq.	DCOS
Formation d'ozone photochimique	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	FOP
Energie primaire	MJ	EP
Energie procédé	MJ	EPRO
Consommation d'eau totale	(L)	CE

L'analyse de cycle de vie peut être plus large si on parle du traitement en fin de vie des matériaux, de la production des infrastructures, des machines et les moyens de transport nécessaires à la production et au traitement en fin de vie des matériaux ou énergies mobilisées. Dans cette étude ces impacts ne sont pas pris en compte à cause des données indisponibles. Les impacts environnementaux ne seront donc évalués que sur la phase de production et d'usage du bâtiment. On écrit alors :

$$I_{LCA} = I_{PROD} + I_{EXP,50ans} \quad \text{Eq.20}$$

$I_{LCA}$  : Impact environnemental sur le cycle de vie du bâtiment ;

$I_{PROD}$  : Impact de la production des composants mis en œuvre ;

$I_{EXP,50ans}$  : Impact de l'exploitation du bâtiment sur le cycle de vie ;

#### 2.3.2.4 Indicateur lié aux aspects sociétaux : confort thermique

Aujourd'hui, nous passons plus de 90% de notre temps dans des espaces clos dont une très grande proportion dans des bâtiments. De ce fait, des critères de confort et plus généralement de qualité des espaces intérieurs doivent être satisfaits afin d'assurer des conditions sanitaires, de sécurité et de confort acceptable. On parle alors du confort thermique, confort acoustique, confort visuel, la qualité de l'air et d'autres aspects liés à la fonctionnalité et la sécurité. Dans les travaux de cette thèse, nous nous focalisons sur le confort thermique qui est plus directement liée au comportement thermique des bâtiments. Les autres aspects peuvent faire partie d'un travail de recherche complémentaire.

Plusieurs approches d'évaluation du confort thermique ont été proposées dans la littérature. La méthode la plus simple est de calculer l'inconfort à partir de la température de l'air ou la température opérative. Cette dernière présente l'avantage d'inclure la convection et le

rayonnement des parois et donc permet de mieux modéliser la température ressentie par l'occupant. Dans ce cas, deux caractéristiques principales du confort peuvent être illustrées.

- La durée de l'inconfort au cours de laquelle un dépassement du seuil de confort est constaté ;
- L'intensité du confort qui est définie comme étant l'intégrale de la différence entre la température opérative et le seuil du confort sur la période d'occupation. Cette intensité est exprimée en degrés heures.

D'après les travaux de Fanger (Fanger, 1970), il a été constaté que la sensation du confort par les occupants ne dépend pas seulement de la température intérieure, mais aussi de la préférence de chaque individu. C'est sur cette base que la norme NF EN ISO 7730 a introduit deux indices pour l'évaluation du confort thermique des occupants :

- L'indice PMV (Predicted Mean Vote) qui représente la préférence des individus exprimée en fonction de la différence entre la production de la chaleur métabolique et la dissipation de la chaleur dans le local sous condition de température et de vêture donnée. Il permet de prévoir le vote moyen d'un groupe de personne sur une échelle graduée tout en exprimant leur sensation thermique. Il est calculé comme suit :

$$PMV = 0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028) \cdot L \quad \text{Eq.21}$$

Avec :

M : Métabolisme énergétique [W/m<sup>2</sup>]

L : Différence entre chaleur produite et dissipée

- L'indice PPD (Percentage of People Dissatisfied) qui est déduit à partir du PMV. Il permet de calculer le pourcentage des personnes probablement insatisfaites dans un local avec des conditions thermiques données (De Dear, 2004). Il s'écrit comme suit :

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad \text{Eq.22}$$

Cette méthode reste limitée aux conditions de l'expérience (Local, nombre de participants... etc.). C'est pour cela que des travaux plus récents ont utilisé l'approche dite adaptative (Emmerich et al., 2011 ; Nicol, 2011 ; Lapisa et al., 2013). Elle est basée sur le calcul d'une température moyenne glissante qui modélise l'adaptation des occupants avec leur environnement. La formule de cette température est la suivante :

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{rm-1} \quad \text{Eq.23}$$

Avec :

$\theta_{rm}$  est la température moyenne glissante du jour,

$\theta_{ed-1}$  est la température moyenne journalière extérieure de la veille,

$\theta_{rm-1}$  est la température moyenne glissante de la veille,

$\alpha$  est une constante de temps comprise entre 0 et 1 (Valeur recommandée 0,8).

Le traçage de la température opérative intérieure en fonction de la température extérieure en moyenne glissante pondérée exponentiellement permet de définir une plage de température de confort limitée entre une valeur maximale et minimale de la température opérative.

Dans le cas des bâtiments neufs ou rénovés et non climatisés, ces limites sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \theta_{i,max} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 + 3 \\ \theta_{i,min} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 - 3 \end{cases} \quad \text{Eq.24}$$

Avec :

$\theta_{i,max}$  : la limite haute de la température opérative [°C] ;

$\theta_{i,min}$  : la limite basse de la température opérative [°C] ;

Il est à noter que ces limites ne s'appliquent que lorsque les conditions thermiques dans les espaces sont régulées d'abord par les occupants. Finalement, le confort thermique (*CT*) sera évalué par la somme de la différence entre la température opérative et sa limite maximale sur la période d'occupation. On écrit alors :

$$CT \text{ (}^\circ\text{C. h)} = \sum_{\text{occupation}} (\theta_{op} - \theta_{i,max})_{(\theta_{op} > \theta_{i,max})} \quad \text{Eq.25}$$

### **Remarque :**

Dans le cadre de notre travail, nous considérons dans un premier temps que les bâtiments ne sont pas climatisés et nous évaluons donc les surchauffes en été. Dans le cas où les degrés heures d'inconfort en été sont très élevés, un système de climatisation sera utilisé. Dans ce cas, on parlera de la consommation de refroidissement.

## **2.3 Méthodes pour l'aide multicritère à la décision**

Les développements suivants s'intéressent à l'état de l'art sur les méthodes d'aide multicritère à la décision.

### **2.4.1 Approches par itération de simulations**

L'aide à la décision dans cette approche est basée sur l'itération de simulations de bâtiment à partir d'une configuration de référence. Une procédure itérative de recherche de solution est donc effectuée jusqu'à identifier une configuration satisfaisante. Ensuite, une série de recommandations sont définies en utilisant l'analyse énergétique de simulation.

Dans le cas où la solution ne convient pas, il faut alors générer une autre solution de référence ou la redéfinition d'autres objectifs d'évaluation. Des études paramétriques ou des arbres de décision peuvent être utilisés pour guider les concepteurs dans la génération de programmes.

Par exemple, Rosenfeld et Shohet (Rosenfeld, Shohet, 1999) proposent une méthodologie d'aide à la décision pour la réhabilitation des bâtiments existants basée sur quatre étapes :

- ✓ Etude préliminaire ;
- ✓ Evaluation et classement ;
- ✓ Génération des alternatives de réhabilitation ;
- ✓ Comparaison technico-économique des solutions générées.

Généralement, la recherche de solution efficace par l'itération des simulations prend souvent un temps très élevé. En outre, elle nécessite une connaissance d'un expert pour faire des choix rationnels surtout dans le cas multicritère. La non-maîtrise du problème peut présenter le risque d'exécuter des configurations qui ne sont pas optimales. En effet, le recours ou le développement de méthodes robustes s'avère primordial pour mieux guider les concepteurs et les décideurs à faire les choix les plus appropriés pour la construction ou la réhabilitation énergétique des bâtiments (Diakaki et al., 2008).

#### **2.4.2 Approches par analyse multicritère de la décision (MCDA)**

Les approches par analyse multicritère de la décision (MCDA: Multi Criteria Decision Analysis) sont basées sur la modélisation des préférences des décideurs qui influencent le processus de décision. Roy propose de distinguer trois familles de méthodes (Roy, 1985):

- Approche du critère unique de synthèse
- Approche du surclassement
- Approche par désagrégation des préférences

##### **2.4.2.1 Approche du critère unique de synthèse**

L'approche du critère unique de synthèse est la plus classique. Il s'agit d'évacuer toute situation d'incomparabilité entre les solutions et synthétiser les performances multicritères de ces solutions sous la forme d'une règle (une fonction d'agrégation), par une modélisation élaborée des préférences des décideurs (Maystre et al., 1994). Parmi les diverses formes des critères de synthèse, on trouve la somme pondérée, l'analyse de la valeur multi-attributs (MAVT) et l'analyse de l'utilité multi-attributs (MAUT).

Ces approches mobilisent l'agrégation des fonctions de valeur ou d'utilité dont l'analyste demande au décideur d'attribuer des valeurs à différents niveaux de performances sur un critère donné. Ces fonctions sont définies par une modélisation mathématique des préférences et nécessitent donc une connaissance explicite des solutions efficaces. Elles sont enfin agrégées par pondération pour former un critère unique.

Ce type de méthodes a été déjà utilisé pour la conception énergétique des bâtiments. Par exemple, (Blondeau et al., 2002) ont utilisé la méthode MAUT pour la détermination de la stratégie de ventilation la plus adéquate dans le cas d'un bâtiment d'enseignement en tenant compte des critères de la qualité de l'air, du confort des occupants et de la consommation d'énergie. Les auteurs ont montré que les résultats sont très dépendants de la manière avec laquelle la fonction d'utilité a été définie. Ce qui montre la limitation de cette méthode.

##### **2.4.2.2 Approche du surclassement**

L'approche du surclassement a été fondée par Bernard Roy à la fin des années 1960 (Roy, 1985). Elle repose sur le même principe que l'approche du critère unique de synthèse, mais en

acceptant cette fois-ci les situations d'incomparabilité. Cette approche est constituée de deux étapes à savoir le développement d'une relation de surclassement, et l'évaluation des solutions alternatives.

Une relation de surclassement est définie comme étant une relation binaire utilisée pour estimer la préférence entre une solution  $x$  par rapport à une solution alternative  $x^*$ . Cette préférence est définie sur la base des indications existantes à l'appui de la préférence de  $x$  par rapport à  $x^*$  (concordance des critères) et des indications existantes contre la préférence de  $x$  par rapport à  $x^*$  (discordance de critères). La construction de la relation de surclassement est basée sur les performances des solutions et l'information préférentielle (poids et seuils).

À partir de cette relation, l'étape suivante consiste à utiliser la relation de surclassement pour la prise de décision (choix et classement des solutions alternatives). Dans cette étape, des procédures heuristiques sont utilisées pour l'évaluation des solutions alternatives sur la base de la relation de surclassement développé. En fonction des seuils de préférence, l'indifférence et le veto définis par le décideur, la préférence de la solution  $x$  par rapport à la solution  $x^*$  est évaluée, sur chacun des critères.

Dans la littérature on trouve plusieurs méthodes basées sur l'approche de surclassement. Parmi les méthodes les plus utilisées, on trouve ELECTRE (I, II, III, IV et tri) (Roy, 1991), ainsi que la méthode PROMETHEE (Brans, Vincke, 1985).

(Blondeau et al., 2002) ont utilisé aussi la méthode ELECTRE pour le même problème présenté précédemment dans 4.2.1. (Rutman et al., 2005) utilisent la méthode ELECTRE II pour la conception des systèmes de climatisation dans un bâtiment à usage bureau en prenant comme critères le confort thermique, la qualité de l'air intérieur et le confort acoustique. (Catalina, 2009) a utilisé la méthode ELECTRE III à partir d'une modélisation polynomiale. Les résultats obtenus avec cette méthode sont difficiles à exploiter surtout dans le cas où il y a plusieurs actions potentielles à choisir et donc des difficultés à prendre des décisions.

#### **2.4.2.3 Approche du jugement local interactif**

Pour le cas de l'approche du jugement local interactif, il s'agit d'accorder la primauté à des jugements locaux, c'est-à-dire ne mettant en jeu qu'un petit nombre d'actions et cela en dehors de toute règle explicite apportant une réponse synthétique au problème d'agrégation des performances. Il s'agit aussi d'explicitier un protocole organisant l'interaction entre d'une part le décideur et d'autre part l'homme d'étude et/ou un ordinateur en vue de faire émerger la prescription en fonction de la problématique retenue (Maystre et al., 1994). Cette méthode repose sur l'existence d'une fonction d'utilité et sur des informations demandées au décideur et donc toujours la même problématique que les autres approches.

#### **2.4.3 Approche par l'optimisation multicritère**

L'approche par l'optimisation multicritère fait appel à des algorithmes mathématiques pour l'aide à la décision (Mavrotas et al., 2008). Ces méthodes permettant de trouver les solutions optimales des problèmes d'optimisation multicritère par la détermination des compromis entre les objectifs prédéfinis (Deb, 2001).

### 2.4.3.1 Formulation d'un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation consiste à chercher le minimum, le maximum ou une valeur cible d'une ou de plusieurs fonctions par rapport à toutes les variables de décision. Des informations complémentaires sur les contraintes sont aussi souvent introduites (Dodge, 2004). Toutes les variables de décision doivent respecter ces contraintes. Dans le cas contraire, la solution n'est pas réalisable. Le problème d'optimisation sous contraintes peut être formulé mathématiquement comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } \vec{f}(\vec{x}) = (f_i(x)) \text{ (i fonction à optimiser)} \\ \text{Tel que } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \text{ (m contraintes d'inégalité)} \\ \text{et } \vec{h}(x) = 0 \text{ (p contraintes d'égalité)} \\ \text{Avec } \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m, \vec{h}(x) \in \mathbb{R}^p \end{array} \right. \quad \text{Eq.26}$$

Un minimum global  $x^*$  de la fonction  $f(\vec{x})$  existe si  $f(\vec{x}^*) < f(\vec{x})$  quel que soit  $\vec{x}$  tel que  $\vec{x}^* \neq \vec{x}$ .

Pour convertir un problème de maximisation à un problème de minimisation, le principe de dualité en optimisation peut être utilisé en multipliant les fonctions objectifs à maximiser par -1 (et réciproquement) (Goh, 2002).

Généralement, un problème d'optimisation multicritère est constitué de deux étapes. La première est la recherche d'un ensemble de solutions techniques potentielles via des algorithmes mathématiques. Ensuite, la génération de la meilleure solution est réalisée via une approche de résolution. Ces deux étapes peuvent être séparées ou couplées en fonction de l'algorithme de calcul.

### 2.4.3.2 Algorithmes d'optimisation

Différentes approches par résolution multicritère existent dans la littérature. (Collette, Siarry, 2011) ont classé ces méthodes en fonction du type de problème. Dans le cas d'un problème combinatoire, les méthodes heuristiques spécialisées, les Métaheuristiques et les méthodes exactes spécialisées peuvent être utilisées. Alors que dans le cas du problème continu, en plus des Métaheuristiques, on trouve aussi les méthodes déterministes, les méthodes locales et la programmation linéaire.

#### 2.4.3.2.1 Méthodes exactes

Différentes techniques d'optimisation exacte existent, dont les méthodes énumératives, la programmation dynamique, l'algorithme A\* et la séparation et évaluation (branch and bound). Le principe de base de ces méthodes est que les fonctions objectifs sont évaluées en chaque point de l'espace des solutions jusqu'à l'obtention de l'optimum global. Par exemple la méthode de 'Branch and Bound' est basée sur le processus suivant :

- Diviser l'espace de recherche en sous-espaces ;
- Chercher une borne minimale en terme de fonction objectif associée à chaque sous-espace de recherche ;
- Eliminer les "mauvais" sous-espaces ;

- Reproduire les étapes précédentes jusqu'à l'obtention de l'optimum global.

Cette méthode est plutôt utilisée dans le cas où le nombre de variables n'est pas très élevé, ce qui n'est pas le cas dans la pratique. En effet, leur utilisation pour l'optimisation multi objectif dans notre problème n'est pas très efficace vu le nombre élevé de paramètres sélectionnés.

#### **2.4.3.2.2 Méthodes déterministes**

Dans le cas des problèmes continus, le recours à des méthodes d'optimisation déterministes est le plus classique. Ces méthodes se caractérisent par une exploration systématique de l'espace de recherche. Il s'agit d'une méthode de recherche séquentielle de l'optimum d'un problème d'optimisation. La continuité et la dérivabilité des fonctions 'objectifs' sont dans ce cas obligatoires. L'optimisation par les méthodes déterministes peut être directe en exploitant les fonctions 'objectifs' (par exemple l'algorithme de simplex) ou indirecte en utilisant les gradients de ces derniers.

##### **2.4.3.2.2.1 Méthode du simplex Nelder Mead**

La méthode du simplex Nelder-Mead (Nelder, Mead, 1965) est la plus populaire parmi les méthodes déterministes directes qu'il ne faut pas confondre avec la méthode du simplex en programmation linéaire. C'est une méthode facile à utiliser pour la recherche séquentielle de l'optimum d'un problème d'optimisation. Elle ne nécessite aucune information sur la dérivée de la fonction étudiée. Le principe de cette méthode est d'utiliser  $(n+1)$  points de l'espace de recherche où  $n$  le nombre de paramètres du problème afin de définir une direction d'amélioration des fonctions 'objectifs'. Un calcul itératif est réalisé en supprimant à chaque fois le point le plus mauvais à partir duquel la génération d'un nouveau point est effectuée. Il est à noter que les points éliminés ne doivent pas être réutilisés ce qui permet d'éviter de converger vers des points moins efficaces. Le simplex est amélioré par quatre transformations à savoir la réflexion et le rétrécissement proposées par (Spendley et al., 1962) pour le changement de la taille du simplex. L'expansion et la contraction sont proposées par (Nelder, Mead, 1965) pour le changement de sa taille. Ces transformations sont appliquées jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt.

L'avantage principal de cette méthode est qu'elle ne nécessite aucune information sur la dérivée de la fonction étudiée. En revanche, une attention particulière doit être faite lors du choix du point de départ. En outre, la convergence vers un optimum local est fortement probable. Enfin, la recherche d'une surface de compromis nécessite un calcul itératif depuis différents points initiaux.

##### **2.4.3.2.2.2 Les méthodes de gradient**

Comme leur nom l'indique, ces méthodes utilisent le gradient d'une fonction 'objectif' pour la recherche de l'optimum. Dans ce cas, cette fonction doit être obligatoirement dérivable. Les étapes de calculs sont les suivantes :

- Définition d'un point de départ  $x_0$  ;
- Calcul du gradient de la fonction 'objectif'  $\nabla f(x_0)$  ;
- Détermination de la longueur du pas de minimisation  $\lambda^k = \arg \min(f x_k - \lambda \nabla f(x^k))$  ;

- Calcul itératif jusqu'à la satisfaction du critère de convergence par la formule :

$$x^{k+1} = x^k - \lambda^k \frac{\nabla f(x^k)}{\|\nabla f(x^k)\|} \quad \text{Eq.27}$$

Cette méthode est efficace dans le cas où la fonction 'objectif' est de type polynomial. Par contre, trois inconvénients majeurs se présentent pour ces méthodes :

- Dans la pratique, les fonctions à optimiser peuvent ne pas être dérivables et parfois ne pas être continues.
- L'élaboration d'une fonction polynomiale prend beaucoup de temps ;
- Il existe un risque de convergence prématurée vers un optimum local, l'optimum global n'est obtenu que lorsque le point initial de départ choisi est proche de cet optimum.

#### 2.4.3.2.3 Métaheuristiques stochastiques

Lorsque les méthodes présentées précédemment sont inefficaces, par exemple pour un problème purement discret, les méthodes métaheuristiques peuvent être alors la solution à utiliser. Il existe deux familles de méthode métaheuristiques. Les métaheuristiques dites de voisinage qui ne font évoluer qu'une seule solution à la fois (par exemple la méthode de recuit simulé, recherche tabou, etc.). Alors que les métaheuristiques distribuées permettent une manipulation simultanée des solutions générées dans chaque étape du processus de la recherche de la surface du compromis (par exemple les algorithmes génétiques).

Ces méthodes partagent des caractéristiques communes :

- Elles sont d'origine combinatoire et peuvent être aussi appliquées aux problèmes continus d'une manière plus ou moins aisée ;
- Elles sont stochastiques : des choix aléatoires des solutions de départ permettent d'éviter un nombre élevé des combinaisons d'un problème discret ;
- Elles sont directes et ne nécessitent aucune information sur le gradient de la fonction 'objectif'. Elles ne requièrent donc aucune formulation analytique ni condition de régularité;
- Elles sont largement inspirées par des analogies avec différents domaines scientifiques. Par exemple avec la physique (recuit simulé, diffusion simulée, etc.), avec la biologie (algorithmes génétiques, recherche tabou, etc.) ou avec l'éthologie (colonies de fourmis, essaims de particules, etc.) ;

Elles partagent aussi les mêmes inconvénients. Le choix des paramètres des algorithmes est très difficile. En effet, il va falloir tester plusieurs configurations pour connaître le degré d'évolution de la surface du compromis. Le temps de calcul est aussi élevé. Finalement, les théorèmes de convergence sont souvent inexistant.

##### 2.4.3.2.3.1 Recuit simulé

L'expérimentation physique de recuit utilisée par les métallurgistes a inspiré certains chercheurs pour le développement de la méthode d'optimisation dite « recuit simulé ». Cette

expérience repose sur le principe de porter un métal à une température élevée et ensuite de le refroidir lentement afin que les atomes puissent s'ordonner avec moins d'énergie et donc obtenir un arrangement parfait.

Cette expérimentation est la base de la méthode d'optimisation du recuit simulé. Dans un premier temps, une configuration initiale est générée à partir de laquelle un calcul itératif est effectué. Un paramètre fictif qui contrôle l'algorithme est introduit représentant la température pour les métallurgistes. En effet, on définit une suite de fonctions donnant la probabilité d'acceptation d'une mauvaise solution, pour chaque fonction 'objectif' :

$$\Pi_i = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\Delta f_i}{T_n}\right) & \text{si } \Delta f_i > 0 \\ 1 & \text{si } \Delta f_i \leq 0 \end{cases} \quad \text{Eq.28}$$

Après avoir calculé toutes les probabilités, l'agrégation de ces dernières est alors effectuée sous la forme suivante :

$$t(\Pi, \lambda) = \prod_{k=1}^N (\Pi^k)^{\lambda^k} \quad \text{Eq.29}$$

Avec :

$\Pi$  : ensemble des  $\Pi_k$ ,  $k = \{1, \dots, N\}$

$\lambda$  : ensemble des  $\lambda^k$ ,  $k = \{1, \dots, N\}$

$\lambda^k$  : le coefficient de pondération relatif à une fonction objectif.

Le principal avantage de cette méthode est sa facilité de mise en œuvre et d'éviter le piège des optimums locaux. Par contre, un nombre considérable de paramètres est à régler dans l'algorithme de calcul ce qui représente l'inconvénient majeur de cette méthode.

#### 2.4.3.2.3.2 Méthode Tabou

La méthode Tabou repose sur l'introduction d'une mémoire permettant de tirer des informations des opérations précédentes. En effet, cela permet d'éviter lors de la recherche de l'optimum, des configurations devenues taboues et donc éviter des optimums locaux déjà identifiés.

Cette méthode fait évoluer une configuration initiale, à partir de laquelle un ensemble de solutions est construit et dont les fonctions 'objectifs' seront évaluées.

Afin de conserver la mémoire de l'algorithme le plus longtemps possible, deux mécanismes supplémentaires sont utilisés :

- L'intensification qui consiste à explorer d'autres zones d'espace des objectifs afin d'identifier des solutions potentiellement intéressantes.
- La diversification qui permet la redirection de la recherche vers des zones qui sont rarement exploitées.

### 2.4.3.2.3.3 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont largement basés sur la théorie d'évolution naturelle des espèces introduite par Darwin. Outre la possibilité de parallélisation des calculs, l'avantage de cette méthode est qu'elle permet de traiter à la fois les problèmes continus et discrets. De plus, elle ne nécessite aucune information sur la nature de la fonction 'objectif'.

Cette méthode repose sur la génération d'une population initiale qui évolue via les opérations de la mutation, du croisement et de la sélection afin de chercher les meilleures solutions possible du problème.

### 2.4.3.2.3.4 Autres méthodes

D'autres méthodes existent pour la résolution des problèmes d'optimisation. On s'est limité sur quelques-unes qui représentent les méthodes les plus populaires et qui ont donné des résultats satisfaisants dans la littérature. Ceci n'empêche pas donc d'utiliser d'autres méthodes comme la méthode de la colonie de fourmis, l'essaim de particules ou encore les réseaux de neurones artificiels.

## 2.4.3.3 Approches de résolution

### 2.4.3.3.1 Méthodes Agrégées

#### 2.4.3.3.1.1 Méthode des sommes pondérée

C'est la méthode la plus facile à mettre en œuvre. Il consiste à agréger plusieurs fonctions 'objectifs' sous la forme d'une somme pondérée. Dans le cas d'un problème de minimisation, le système suivant doit être résolu :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } \vec{f}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i(x) \\ \text{Tel que } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\ \text{et } \vec{h}(x) = 0 \\ \sum_{i=1}^k w_i = 1 \\ w_i \geq 0 \end{array} \right. \quad \text{Eq.30}$$

Avec  $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k$ ,  $\vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m$ ,  $\vec{h}(x) \in \mathbb{R}^p$

Les solutions optimales obtenues par cette méthode sont non dominées. La difficulté de cette méthode réside dans le choix des coefficients de pondération qui nécessite une connaissance préalable du problème. En outre, elle ne permet pas de sélectionner toutes les solutions optimales sauf dans le cas de plusieurs itérations des pondérations ce qui conduit à un temps considérable pour l'identification de la surface de compromis. Finalement, cette méthode

n'est applicable qu'à des ensembles convexes. En effet cela nécessite une connaissance préalable de la forme de la fonction étudiée.

### 2.4.3.3.1.2 Méthode de la distance à un objectif de référence

La transformation du problème d'optimisation multicritère en monocritère est effectuée cette fois-ci par la minimisation d'une distance par rapport à un point de référence et l'agrégation des fonctions 'objectifs' avec une certaine puissance. Le point de référence peut être le point idéal, ou un autre point qui représente mieux les préférences des décideurs. Dans ce cas, le problème d'optimisation s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Minimiser } L_r(\vec{f}(\vec{x})) &= \left[ \sum_{i=1}^k |R_i - f_i(\vec{x})|^r \right]^{1/r} \\ \text{Tel que } \vec{f}_j(\vec{x}) &\leq \epsilon_j \\ \vec{g}(\vec{x}) &\leq 0 \\ \text{et } \vec{h}(x) &= 0 \end{aligned} \tag{Eq.31}$$

$$\text{Avec } \epsilon_j \geq 0, \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m, \vec{h}(x) \in \mathbb{R}^p$$

En fonction de la valeur de r, la distance change. Lorsque r tend vers l'infinie, on retrouve la méthode dite Min-Max ou méthode de Tchebychev. Dans ce cas la distance s'écrit :

$$L_\infty(\vec{f}(\vec{x})) = \max_{i \in [1..k]} \left[ \sum_{i=1}^k |R_i - f_i(\vec{x})| \right] \tag{Eq.32}$$

On peut aussi utiliser le coefficient de pondération pour permettre de chercher un point dans une certaine direction. Cette méthode dépend fortement du point de référence. Si ce point est mal choisi, la détermination des solutions optimales n'est pas garantie. En outre, cette méthode est parfois sensible à la convexité de la fonction étudiée.

### 2.4.3.3.1.3 Méthode du compromis

Pour résoudre le problème de convexité d'une fonction 'objectif', la méthode du compromis ou autrement dite  $\epsilon$ -contrainte, a été développée. Cette méthode consiste à transformer le problème en conservant une fonction 'objectif' et en transformant les autres objectifs en contraintes d'inégalité. La formulation du problème s'écrit alors :

$$\left\{ \begin{aligned} &\text{Minimiser } \vec{f}_i(\vec{x}) \\ &\text{Tel que } \vec{f}_j(\vec{x}) \leq \epsilon_j \\ &\quad \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\ &\quad \text{et } \vec{h}(x) = 0 \end{aligned} \right. \tag{Eq.33}$$

$$\text{Avec } \epsilon_j \geq 0, \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m, \vec{h}(x) \in \mathbb{R}^p$$

Une connaissance préalable des contraintes  $\epsilon_j$  est requise pour toutes les fonctions 'objectifs' transformées. C'est l'itération de ces contraintes qui permettent la génération des différentes solutions construisant la surface de compromis.

Le principal inconvénient de cette méthode est le choix arbitraire des valeurs  $\epsilon_j$ , ce qui parfois ne permet pas d'obtenir une bonne répartition des solutions optimales et donc des difficultés lors de l'exploitation des résultats.

#### 2.4.3.3.1.4 Méthode de but à atteindre

Dans cette méthode, un vecteur d'objectif ou de référence doit être défini par l'utilisateur. Ce dernier permet de réaliser la recherche de solutions sur des directions déterminées sans être influencées par la convexité du problème. La démarche de l'optimisation est la suivante :

- Choisir un vecteur de fonction 'objectif' initial  $\vec{F}$  ;
- Choisir une direction de recherche en fournissant des coefficients de pondération  $\vec{w}$  ;
- Finalement, minimiser un coefficient scalaire  $\lambda$  (c'est le degré de sur ou sous-dépassement de l'objectif  $\vec{F}$ ) qui représente l'écart par rapport à l'objectif initial  $\vec{F}$ .

$$\begin{aligned} & \text{Minimiser } \lambda \\ & \text{Tel que } \vec{f}_j(\vec{x}) - w_j \lambda \leq \vec{F}_j \\ & \quad \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\ & \quad \text{et } \vec{h}(x) = 0 \end{aligned} \tag{Eq.34}$$

$$\text{Avec } \epsilon_j \geq 0, \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m, \vec{h}(x) \in \mathbb{R}^p$$

Cette méthode dépend aussi du choix du vecteur de référence. De plus, si les coefficients de pondération sont mal choisis, une non-uniformité de la représentation des solutions sur la surface de compromis peut être observée.

Basée sur le même concept, on trouve aussi la méthode dite du but programmé (en anglais Goal programming). La principale différence est que la transformation du problème d'optimisation amène à des contraintes d'égalité. La méthode du but programmé, semblable à la méthode du but à atteindre, soulève les mêmes critiques.

#### 2.4.3.3.2 Approches par résolution multicritère

L'approche par résolution multicritère est basée sur le principe de la dominance. Cette dernière est définie comme étant les relations d'ordre, servant de critères de décision pour la comparaison et le classement des solutions multicritères. Pour qu'une solution soit optimale en fonction de plusieurs critères, il faut qu'il existe une relation de dominance entre la solution considérée et les autres solutions, dans le sens suivant:

On dit que le vecteur  $\vec{x}_1$  domine le vecteur  $\vec{x}_2$  si :

- $\vec{x}_1$  est au moins aussi bon que  $\vec{x}_2$  dans tous les objectifs, et,

- $\vec{x}_1$  est strictement meilleur que  $\vec{x}_2$  dans au moins un objectif.

Ceci peut être formulé mathématiquement, dans le cas d'un problème de minimisation, lorsque la solution  $x^*$  domine une solution  $x$  de l'espace de décision si et seulement si (Deb, 2001) :

$$\begin{cases} \forall i \in [1..N], f_i(x^*) \leq f_i(x) \\ \exists k \in [1..N], f_k(x^*) < f_k(x) \end{cases} \quad \text{Eq.35}$$

L'application de cette définition nous ramène à définir quatre zones différentes au terme de préférence. Ces zones sont représentées dans la Figure 2-2. Si on considère une solution A centrée par rapport à ces zones et qu'on la compare avec une autre solution B, on aura les possibilités suivantes :

- Si la solution B se trouve dans la zone 1, alors la solution A est préférée à la solution B;
- Si la solution B se trouve dans la zone 3, alors la solution A est dominée par la solution B;
- Si la solution B se trouve dans l'un des zones 2 ou 4, alors, on ne peut pas se prononcer sur la préférence de A par rapport à B ou de B par rapport à A.

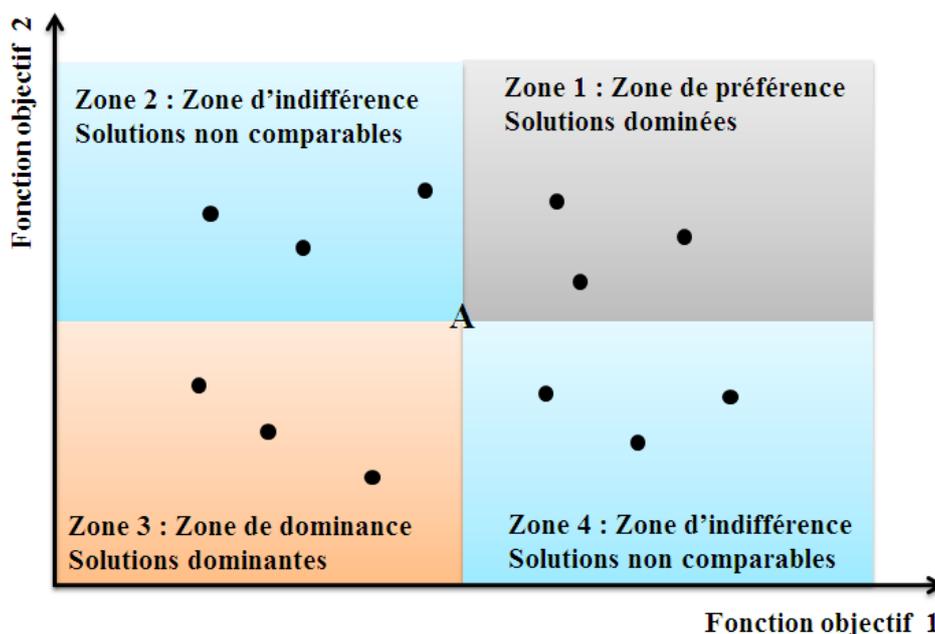


Figure 2-2. Illustration de la relation de dominance dans le cas de deux fonctions objectives.

En effet, on peut définir une surface de compromis qui représente l'ensemble des solutions non dominées ou efficaces de l'espace de recherche. Ce qui est autrement appelé le Front de Pareto. Par exemple, si on considère un problème à deux objectifs (minimiser les fonctions  $f_1(\vec{x})$  et  $f_2(\vec{x})$  sous les contraintes  $\vec{g}(\vec{x}) \leq 0$  et  $\vec{h}(\vec{x}) = 0$ . On appelle S l'ensemble des valeurs dominées du couple  $(f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}))$  quand  $\vec{x}$  respecte les contraintes  $\vec{g}(\vec{x})$  et  $\vec{h}(\vec{x})$ . P est appelé le Front de Pareto (Figure 2-3).

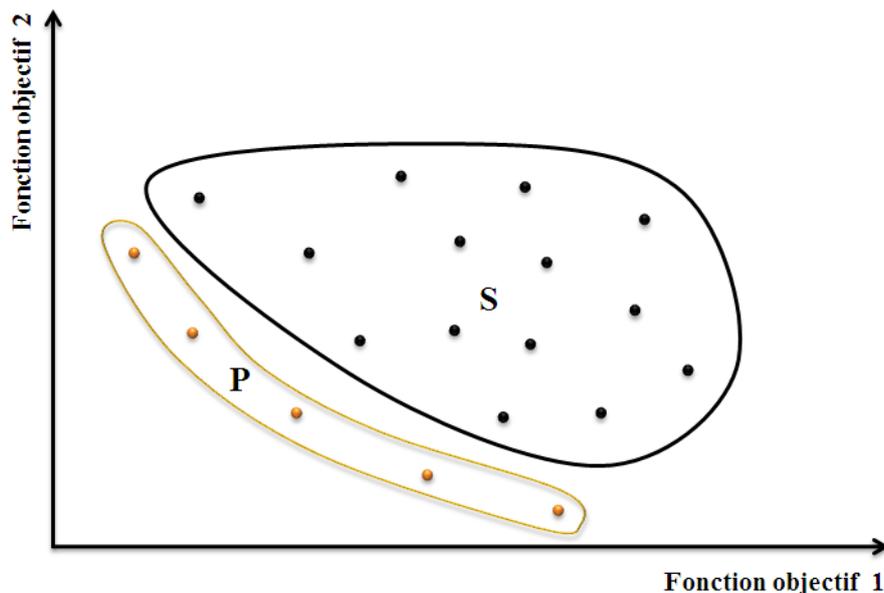


Figure 2-3. Front de Pareto (P) et l'ensemble des solutions dominées (S) sur un problème de minimisation à deux objectifs

Dans cette représentation, il existe deux points caractéristiques qui peuvent être comme des indications pour l'optimisation multicritère :

- Le premier est le point idéal. Ses coordonnées sont obtenues par l'optimisation de chacune des fonctions 'objectifs' dans le sens monocritère. En effet, il ne représente pas la solution optimale du problème sauf dans le cas où les fonctions 'objectifs' ne sont pas conflictuelles. Le point idéal est surtout utilisé comme point de référence dans les algorithmes d'optimisation pour guider la recherche vers la solution la plus optimale.
- Le deuxième est le point "Nadir". Ses coordonnées sont les valeurs opposées du point idéal par rapport au Front de Pareto. Il représente donc les composantes les plus mauvaises pour chaque objectif. Ce point permet de cerner l'espace de recherche pour éviter une éventuelle divergence de solution. La Figure 2-4 illustre le point idéal et le point Nadir sur l'exemple du problème de minimisation à deux objectifs.

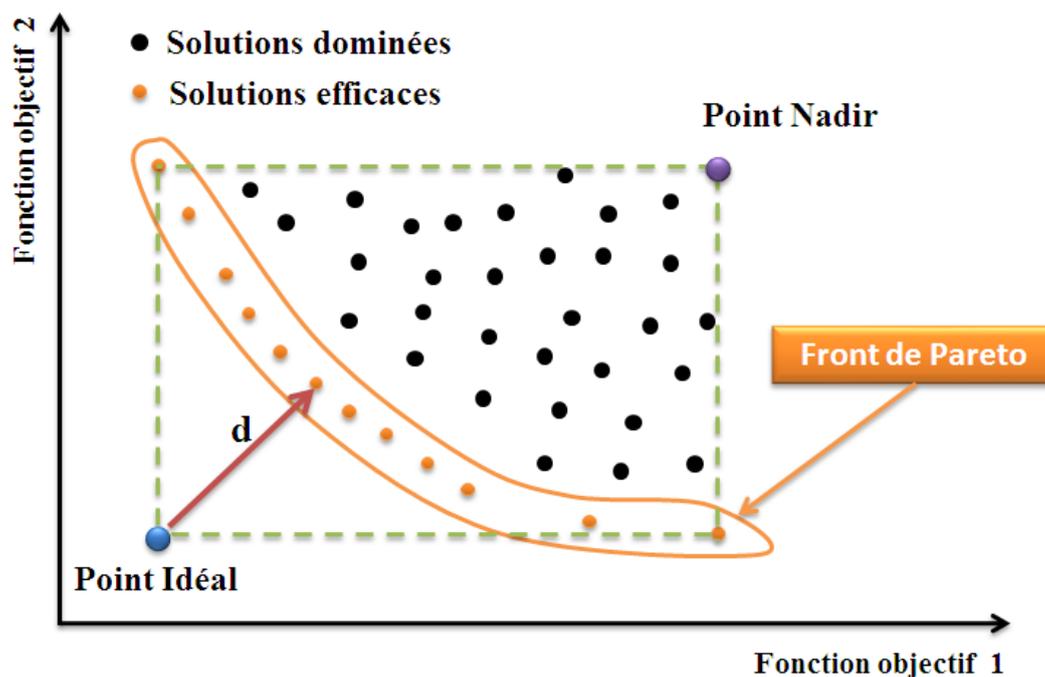


Figure 2-4. Représentation du point idéal et du point “nadir” sur une minimisation à deux objectifs

#### 2.4.4 Approche hybride

L’hybridation entre différentes familles de méthodes d’optimisation présentées précédemment est possible et parfois fournit des résultats efficaces. Par exemple, les méthodes hybrides associent souvent une métaheuristique et une méthode locale est utilisée dans plusieurs travaux (Chang, Shih, 2015 ; Oliveira, 2013). En revanche, l’hybridation est souvent difficile à implémenter et augmente le temps de calcul d’une manière considérable.

#### 2.4.5 Discussion

Cet état de l’art a mis en évidence la diversité des méthodes et des approches de résolution dans le cas d’un problème d’aide à la décision multicritère ayant pour but la conception des bâtiments.

Nous avons constaté que les méthodes exactes sont impraticables vu le nombre important des paramètres d’études à utiliser dans notre problème. Ces dernières présentent plusieurs anomalies qui rendent leurs utilisations par les concepteurs risquée. Un temps de calcul élevé, un paramétrage complexe des algorithmes et la non garantie de converger vers un optimum global sont les principales limites. Il va donc falloir chercher une méthode plus efficace pour remédier à ces problèmes. C’est ce que nous proposons dans la partie suivante.

### 2.4 Proposition d’une méthode d’aide à la décision multicritère

#### 2.5.1 Introduction

L’étude bibliographique précédente nous a permis de conclure que l’aide à la décision multicritère pour la conception ou la réhabilitation énergétique du bâtiment est un problème très complexe. Pour une meilleure résolution de ce problème, il faut chercher à satisfaire les points suivants :

- Avoir un temps de calcul raisonnable,
- Eviter les optimums locaux et donc converger vers les optimums globaux,
- Paralléliser les simulations le maximum possible,
- Permettre de modéliser les contraintes,
- Fournir un ensemble de solutions qui permettent une aide multicritère à la décision.
- Aider à un choix final du problème multicritère.

Nous proposons une méthode d'aide à la décision multicritère basée sur la régression polynomiale via la méthode des plans d'expérience et l'utilisation du Front de Pareto.

## 2.5.2 Méthode des plans d'expériences

### 2.5.2.1 Définition

La méthode des plans d'expériences permet de développer des modèles de prédiction d'un système donné par l'établissement d'une relation de type polynomial entre les variables d'entrée et de sortie avec le moins de combinaisons possibles (Tinsson, 2010). Une matrice d'expériences est construite pour laquelle la réponse du modèle est calculée. Cette matrice est exprimée sous forme adimensionnelle. En effet, le passage des variables dimensionnelles à des coordonnées centrées réduites doit être effectué par l'application de la relation suivante :

$$X = \frac{x - x_0}{P} \quad \text{Eq.36}$$

Avec :

X désigne la valeur centrée réduite qui varie entre -1 et + 1,

x désigne la valeur dimensionnelle qui varie entre  $x_{min}$  et  $x_{max}$

$x_0$  est la valeur au centre du domaine ( $x_{min}$ ,  $x_{max}$ ) définie par :  $x_0 = \frac{x_{min} + x_{max}}{2}$

P est le pas de variation définie par :  $P = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$

### 2.5.2.2 Modélisation polynomiale et détermination des coefficients des polynômes

La modélisation d'un système considéré comme boîte noire revient à exprimer sa réponse à ces facteurs via des coefficients constants. Dans ce cas, un modèle polynomial est donc défini. Dans notre cas, nous posons en préalable que la relation entre les paramètres d'un bâtiment et sa consommation d'énergie ne peut être que linéaire et/ou quadratique et/ou avec des interactions. Ainsi, la réponse peut être mise sous l'une des formes mathématiques suivantes :

- Modèle linéaire :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i \quad \text{Eq.37}$$

- Modèle purement quadratique :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{ii} \cdot X_i^2 \quad \text{Eq.38}$$

- Modèle linéaire avec interaction :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j \quad \text{Eq.39}$$

- Modèle quadratique complet :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} \cdot X_i^2 \quad \text{Eq.40}$$

Où :

$Y$  est la réponse (fonction objectif)

$X_i$  et  $X_j$  sont les paramètres d'entrée écrits en coordonnées centrées réduites

$a_0, a_i, a_j, a_{ij}$  sont les coefficients du modèle à déterminer.

Il est à noter que les modèles d'ordre supérieur ne donnent en général pas plus de précision ainsi les termes d'ordre supérieur à 3 sont souvent négligés.

Le système d'équations peut être aussi écrit sous la forme matricielle suivante :

$$[Y] = [X] [A] \quad \text{Eq.41}$$

Où :

$A$  vecteur des coefficients,

$Y$  vecteur des réponses,

$X$  matrice de calcul ou matrice d'expérience.

Pour la détermination des coefficients du polynôme, le système d'équations est résolu à l'aide de la méthode des moindres carrés en utilisant la relation suivante :

$$A = ([X]^t \times [X])^{-1} \times [X]^t \times [Y] \quad \text{Eq.42}$$

Plusieurs types de plans d'expérience ont été proposés dans la littérature. Le choix d'une matrice d'expérience est le problème fondamental des plans d'expériences afin d'obtenir la meilleure précision avec un nombre minimal de combinaisons.

### 2.5.2.3 Différents types de plans d'expériences

#### 2.5.2.3.1 Plans factoriels complets

C'est le type de plans le plus facile à construire. Dans ce cas, la matrice d'expériences consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs. Si on considère un nombre  $m$  de facteurs à  $n$  niveaux, la taille de la matrice est donc de  $n^m$ . Dans le cas de plusieurs facteurs à différents niveaux, le nombre de combinaison est  $n_1^{m_1} * n_2^{m_2} * \dots * n_k^{m_k}$ .

Pour la construction de ce type de plans, la notation dite de YATE peut être utilisée (Goupy, 2013). Cette dernière consiste à commencer la première ligne par le niveau bas de tous les paramètres auxquels on attribue la valeur -1. Pour la première colonne, on change de signe toutes les lignes. La seconde colonne est obtenue par un changement de signe toutes les deux lignes. Ainsi de suite, jusqu'à la colonne  $k$  qui est obtenue par le changement de signe toutes les  $2^{k-1}$  lignes.

Ce type de plans est plutôt intéressant dans le cas d'un modèle de premier ordre. Dans ce cas le grand avantage est la facilité de la construction de la matrice d'expérience ainsi que

l'analyse des résultats. Par contre, la dimension de la matrice augmente rapidement dans le cas de plusieurs facteurs.

### 2.5.2.3.2 Plans factoriels fractionnaires

Les plans factoriels fractionnaires ont été conçus pour réduire le nombre élevé de combinaisons d'un plan complet. Le nombre d'équations est réduit sous l'hypothèse de négliger toutes les interactions d'ordre trois et toutes celles d'ordre plus élevé. Ceci est effectué sous deux conditions majeures. D'une part, la satisfaction du nombre de degrés de liberté doit être assurée, on doit donc avoir un nombre d'équations au moins supérieur au nombre d'inconnues, et d'autre part, la matrice d'expérience doit comporter un nombre d'équations au moins égal au plus petit commun multiple du nombre de niveaux de toutes les actions disjointes prises deux à deux (principe de l'orthogonalité).

Dans la littérature, on trouve plusieurs types de plans fractionnaires qui ont été développés. Par exemple, les tables de Taguchi sont des plans fractionnaires basés sur les matrices orthogonales d'Hadamard (Roy, 2001 ; Van Nostrand, 2002). Le principe de base est l'utilisation de sous-ensembles symétriques d'un plan factoriel complet. La construction de ce type de plan suppose que les interactions d'ordre supérieur à deux sont négligeables. Les graphes linéaires et les triangles des interactions fournissent le mode de remplissage du plan.

### 2.5.2.3.3 Les plans pour surfaces de réponse

Nous avons vu que les plans d'expériences présentés précédemment ne sont adaptés que pour les modèles du premier ordre. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une modélisation quadratique des phénomènes étudiés. Il est alors nécessaire de passer à des modèles mathématiques du second degré (Dean et al., 2015). On fait ainsi appel aux plans pour surfaces de réponse. Nous présentons par la suite les trois plus importants plans de ce type : les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans Doehlert.

#### 2.5.2.3.3.1 Plans composites

Comme son nom l'indique, un plan composite est constitué de trois parties. La première partie est un plan factoriel complet ou fractionnaire de premier degré. Le deuxième plan appelé plan étoile dont les points sont situés sur les axes avec la même distance par rapport au centre. Et finalement on ajoute un point au centre du domaine d'étude.

Soit un  $n_f$  le nombre d'expériences du plan factoriel  $n_\alpha$  d'expérience du plan étoile. Le calcul de la distance des points du plan étoile ( $\alpha$ ) est effectué en utilisant le critère d'isovariance par rotation est donc on a :  $\alpha = (n_f)^{1/4}$ . Dans le cas où le critère de presque orthogonalité doit être respecté, on utilise la formule suivante :

$$\alpha = \left( \frac{n_f(\sqrt{n_f + n_\alpha + 1} - \sqrt{n_f})^2}{4} \right)^{1/4} \quad \text{Eq.43}$$

#### 2.5.2.3.3.2 Plans de Box-Behnken

Box et Behnken ont proposé dans les années 1960 des plans très efficaces pour les modèles de deuxième degré avec interactions (Robinson, 2008). Les facteurs dans ce cas ont trois

niveaux. Le principe est de satisfaire le critère de presque orthogonalité en plaçant les points d'expérience à la même distance par rapport au centre du domaine d'étude. Ces plans n'existent que dans le cas de 3 à 7 facteurs, 9 à 12 facteurs et 16 facteurs.

### 2.5.2.3.3 Plans de Doehlert

Les plans proposés par Doehlert en 1970 consistent à placer les points expérimentaux d'une façon régulière sur les sommets d'un hexagone (Ryan, 2006). Ceci permet d'étendre le plan vers n'importe quelle direction de l'espace par l'ajout d'autres points qui seront eux aussi uniformément répartis. Malgré ces avantages, les propriétés statistiques sont généralement moins parfaites par rapport aux autres plans.

### 2.5.2.3.4 Plans D-optimaux

Les plans D-optimaux ont été développés pour mieux répondre aux problèmes avec contrainte. Ils sont utilisés aussi pour réduire au maximum possible le nombre des combinaisons dans le cas d'un problème sans contrainte (Goupy, 2013). Les meilleurs points d'expériences sont sélectionnés. Ceci est effectué par la maximisation du déterminant de la matrice  $[X]^t[X]$  et donc la satisfaction du critère de D-optimalité.

### 2.5.2.3.5 Autres plans

D'autres plans peuvent être aussi utilisés pour des cas plus spécifiques. Citons par exemple, les plans de mélanges. Ces derniers sont surtout intéressants lorsqu'il existe des proportions entre les facteurs, ce qui n'est pas le cas dans notre étude. On trouve aussi les plans associés aux carrés latins. Ces plans sont plutôt adaptés pour le cas de variables discrètes. Le principal obstacle à l'utilisation de ces plans est le nombre de niveaux des variables qui est très limité. Ce qui complique la modélisation lors d'une exploitation plus large des variables du problème.

### 2.5.2.4 Evaluation de la précision des polynômes

Avant de commencer la procédure d'optimisation, nous devons d'abord vérifier la précision des modèles polynomiaux et donc une comparaison avec des simulations aléatoires doit être effectuée. Pour cela, des paramètres statistiques tels que l'erreur maximale ( $\Delta_{max}$ ), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur relative moyenne (MRE), l'écart type ( $\sigma$ ) et enfin le coefficient de détermination ( $R^2$ ), seront systématiquement calculés et analysés. Soit n le nombre de simulations aléatoires, alors ces coefficients sont exprimés à l'aide des équations suivantes :

$$\Delta_{max} = \max_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad \text{Eq.44}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad \text{Eq.45}$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \right) \quad \text{Eq.46}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - MAE)^2} \quad \text{Eq.47}$$

$$R^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - MAE)^2}{(y_i - MAE)^2} \quad \text{Eq.48}$$

### 2.5.2.5 Utilisation des plans d'expériences en énergétique du bâtiment

La méthode des plans d'expériences a déjà été utilisée dans le domaine de l'énergétique des bâtiments pour la prédiction des besoins ou de la consommation énergétique, ainsi que pour la réalisation d'analyses de sensibilité sur les paramètres influents sur les fonctions objectifs.

En 2006, Filfli a développé des modèles polynomiaux pour la prédiction de la consommation énergétique annuelle dans le cas des bâtiments tertiaires pour plusieurs zones climatiques en France (Filfli, 2006). Pour cela, il a utilisé les plans fractionnaires et les plans complets. Le coefficient de transmission des parois opaques et du vitrage, l'orientation, le mode de gestion des protections solaires, les équipements de bureautique et l'éclairage, l'inertie thermique, la perméabilité à l'air, le débit d'air neuf, le niveau d'isolation des réseaux de distribution et finalement le rendement des auxiliaires et des systèmes de production de chauffage et de climatisation ont été sélectionnés pour cette étude. La comparaison entre les deux plans d'expériences étudiés a permis de conclure que les plans fractionnaires permettent une réduction importante du nombre de simulations sans perdre de la précision sur la prédiction de la réponse.

Ensuite, (Chlela, 2008) a réalisé une comparaison entre différentes tables de Taguchi, les plans de surface de réponse, le plan de Box Benhnken, les plans D-optimaux et l'hybridation entre certains plans pour la prédiction des besoins de chauffage, de rafraîchissement et de la consommation en énergie finale. Le coefficient de transmission des parois, le facteur solaire des fenêtres, la surface vitrée, l'inertie, l'orientation, la perméabilité à l'air, les gains internes d'éclairages, la sur ventilation mécanique nocturne, et le rendement des systèmes de production de chauffage et de climatisation ont été utilisés comme paramètres de conception d'un bâtiment à usage de bureau. Il a été constaté que les plans D-optimaux présentent une précision satisfaisante, car ils permettent la modélisation des effets quadratiques des paramètres. L'hybridation entre certains plans permet aussi une meilleure précision, mais dans ce cas le temps de calcul est plus élevé.

Finalement, en 2009 Jaffal a développé des modèles de prédiction des besoins de chauffage et de rafraîchissement d'une maison individuelle par l'utilisation des plans D-optimaux avec quatre types de fonction polynomiale, linéaire, linéaire avec des interactions, purement quadratique et quadratique complet (Jaffal, 2009). Le choix des paramètres est issu de l'étude des flux thermiques dans le bâtiment. Il concerne les coefficients de transmission des parois opaques et vitrées, le facteur solaire pour chaque orientation, le taux de renouvellement d'air et l'inertie thermique. Les résultats montrent que la modélisation linéaire est suffisante dans le cas des climats froids grâce à la variation linéaire des besoins de chauffage en fonction des paramètres sélectionnés. Par contre, le recours à des polynômes de second degré s'avère nécessaire dans le cas du climat méditerranéen et pour la prédiction des besoins de rafraîchissement pour les différents climats.

Ces différents auteurs ont développé des modèles polynomiaux des besoins de chauffage, de climatisation et du confort thermique en fonction des paramètres clés de l'enveloppe et des systèmes qui influencent les réponses. Ces travaux ont montré l'efficacité de la méthode pour identifier des modèles polynomiaux en limitant le nombre de simulations à effectuer avec une bonne précision par comparaison aux logiciels de simulation dynamique.

Ces études ont été limitées à l'analyse de sensibilité des paramètres de conception sur un seul critère qui représente les performances énergétiques des bâtiments. Une approche d'optimisation par une résolution multicritère du problème basée sur la méthode des plans d'expérience n'a pas été encore aboutie.

### 2.5.3 Modélisation générale du système

Le modèle d'aide à la décision multicritère que nous proposons dans ce travail de recherche est basé sur la méthode des plans d'expérience et l'approche de résolution de Front de Pareto. Les plans d'expériences sont utilisés pour une prédiction rapide de la consommation énergétique. Pour cela, il nous faut d'abord élaborer le modèle de simulation où il faut introduire le type du climat, les caractéristiques des différentes parois, le scénario d'occupation, etc. Les paramètres d'étude sont donc définis avec leurs intervalles de variation. Par exemple, les valeurs hautes peuvent correspondre aux pratiques de construction usuelle des bâtiments et les valeurs basses peuvent alors correspondre aux limites réglementaires ou à des labels. Ensuite, à partir du nombre de paramètres sélectionnés, un plan d'expérience est défini. Ce dernier permet alors une réduction drastique du nombre de simulations à réaliser. Dans notre cas, les simulations sélectionnées sont réalisées à l'aide du logiciel TRNSYS 3D.

La modélisation du système d'équations sous forme matricielle permet donc de déterminer le polynôme de prédiction de la consommation énergétique. Les coefficients du polynôme représentent l'effet de chaque paramètre sur la réponse. Ainsi, les paramètres les plus influents peuvent être sélectionnés. Ces paramètres seront donc discrétisés en fonction des techniques existantes sur le marché de la construction. Le coût et les impacts sur l'environnement associés à chaque paramètre sont estimés à partir du logiciel CYPE et la base de données INIES respectivement. L'approche de résolution du Front de Pareto est alors appliquée aux différentes combinaisons afin de déterminer les solutions optimales pour l'aide à la décision multicritère. Pour la détermination du meilleur compromis entre les critères, nous cherchons alors le point le plus proche du point idéal (voir 2.4.3.3.2). Ceci est effectué en minimisant la distance entre ce point et les solutions du Front de Pareto. Par exemple dans le cas de trois objectifs, cette distance est calculée à partir de l'équation suivante :

$$d_i = \sqrt{(x_{fi} - x_I)^2 + (y_{fi} - y_I)^2 + (z_{fi} - z_I)^2} \quad \text{Eq.49}$$

Avec  $x_I, y_I, z_I$  les coordonnées du point idéal et  $x_{fi}, y_{fi}, z_{fi}$  sont les coordonnées des points situés dans le Front de Pareto (Figure 2-5).

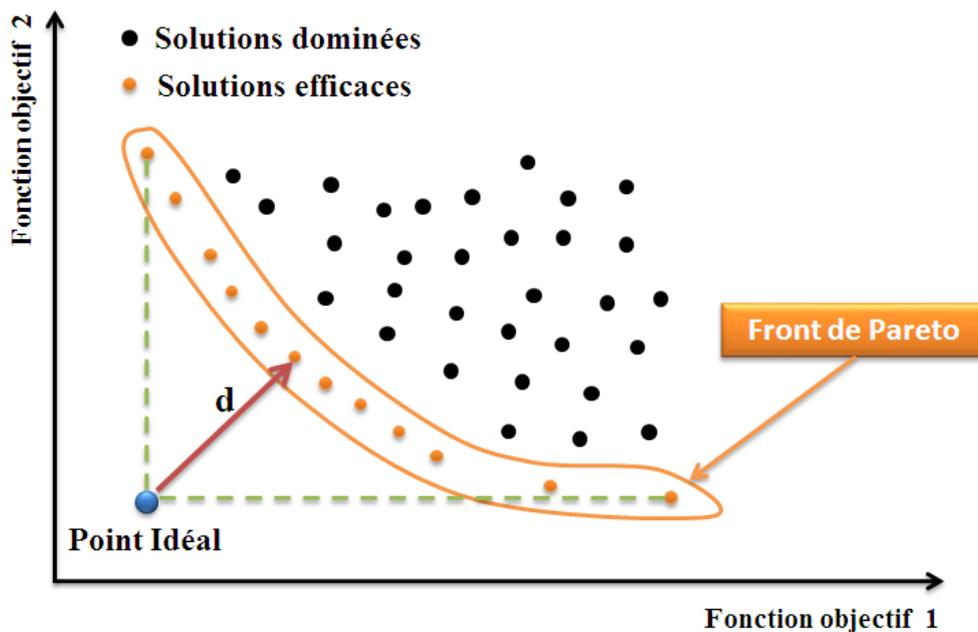


Figure 2-5 : La distance d entre le point idéal et le Front de Pareto dans le cas de deux critères.

La Figure 2-6 montre les différentes étapes à suivre de l'approche proposée d'aide à la décision multicritère soit pour la conception des bâtiments neufs ou la réhabilitation des bâtiments existants.

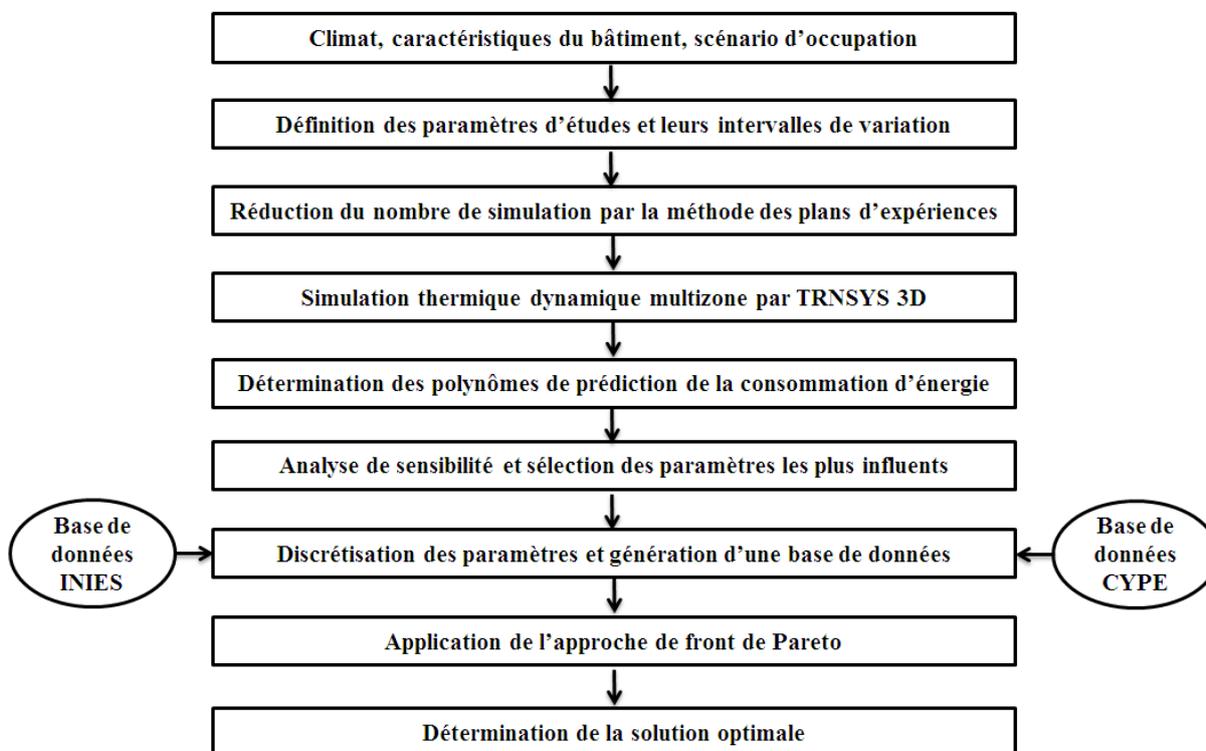


Figure 2-6 : Démarche proposée pour l'aide à la décision multicritère

## 2.5 Exemple d'application et comparaison avec une étude paramétrique complète

### 2.6.1 Présentation du cas d'étude

Il s'agit de présenter un exemple d'application afin de pouvoir comparer une méthode exacte (étude paramétrique complète) et la méthode que nous développons dans la présente étude basée sur la méthode des plans d'expériences et le Front de Pareto. Le bâtiment étudié est une maison individuelle typique de 144 m<sup>2</sup>, 2,8m de hauteur sous plafond avec un taux global des baies vitrées de 20%. Le climat considéré est celui de la ville d'Ifrane au Maroc (climat montagnard froid en hiver). Le plan et la géométrie du bâtiment sont présentés dans la Figure 2-7 ci-dessous.

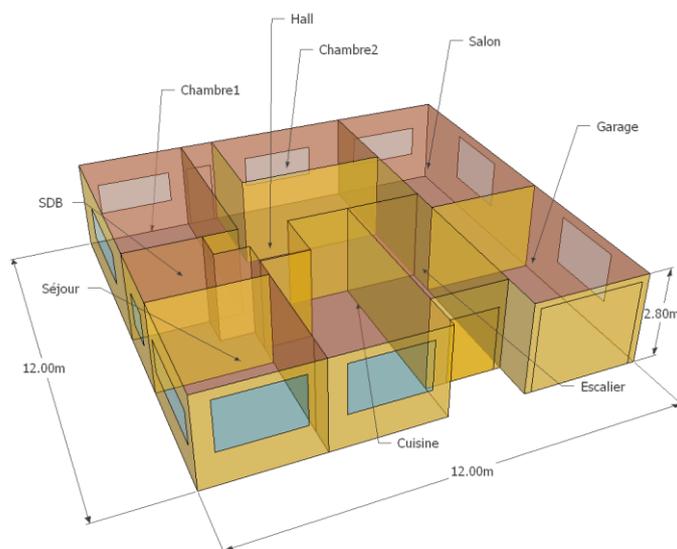


Figure 2-7 : Vue 3D de la maison étudiée.

Le scénario d'occupation, les charges internes et les matériaux de construction sont ceux utilisés pour l'élaboration de la réglementation thermique au Maroc (RTCM). L'objectif, dans le cas de cet exemple, est de chercher le meilleur compromis entre les besoins de chauffage et le coût d'investissement initial pour la conception du bâtiment étudié. Une étude simplifiée est menée et nous choisissons 5 paramètres comme le montre le Tableau 2-3.

Tableau 2-3 : les paramètres d'étude choisis et leurs intervalles de variation.

Paramètre	Symbole	unité	Niveau haut	Niveau bas
Coefficient de transmission des murs extérieurs	$U_m$	(W/m <sup>2</sup> .K)	1,47	0,159
Coefficient de transmission de la toiture	$U_t$	(W/m <sup>2</sup> .K)	1,89	0,163
Coefficient de transmission du plancher-bas	$U_p$	(W/m <sup>2</sup> .K)	1,9	0,17
Coefficient de transmission des vitrages	$U_g$	(W/m <sup>2</sup> .K)	5,8	0,1
Facteur solaire des vitrages	FS	(sans unité)	0,9	0,05

Nous nous proposons ainsi d'exploiter, sur cette étude de cas, la connaissance des solutions exactes pour qualifier la qualité de la méthode d'optimisation proposée dans les travaux de cette thèse.

### **2.6.2 Etude paramétrique complète**

L'étude paramétrique complète est la méthode la plus fiable et la plus précise pour identifier les meilleures solutions du problème. Dans cet exemple, avec un nombre de paramètres égal à 4 considérés comme discrets et un nombre de niveaux pour chaque paramètre égal à 8 (Tableau 2-4), le nombre de simulations est donc  $8^4=4096$ . Une simulation simplifiée par TRNSYS dure environ 40 secondes ce qui se traduit par temps de calcul égale à 1,9 jour. Nous remarquons qu'avec une telle étude très simple le temps de calcul s'avère déjà élevé alors que dans la réalité, le nombre de paramètres à considérer sera beaucoup plus élevé. Cette situation rend l'utilisation de cette méthode très coûteuse.

Tableau 2-4 : Les différentes solutions techniques et leurs prix associés en Dirhams (1€ ≈11 Dhs).

Solution technique	Prix en DH
<b>Isolation des murs extérieurs par polystyrène expansé avec une conductivité de 0,039</b>	
1 cm	6 196,05
4 cm	14 310,58
7 cm	22 500,96
10 cm	30 729,27
13 cm	38 957,58
16 cm	47 185,88
19 cm	55 414,19
22 cm	63 642,49
<b>Isolation de la toiture par polystyrène expansé avec une conductivité de 0,039</b>	
1 cm	5 046,07
4 cm	12 063,05
7 cm	19 473,77
10 cm	26 892,29
13 cm	34 310,82
16 cm	41 729,34
19 cm	49 147,87
22 cm	56 566,40
<b>Isolation du plancher-bas par polystyrène expansé avec une conductivité de 0,039</b>	
1 cm	3 655,17
4 cm	10 143,45
7 cm	16 618,34
10 cm	23 103,28
13 cm	29 588,22
16 cm	36 073,15
19 cm	42 558,09
22 cm	49 043,02
<b>Les vitrages</b>	
FEN1 : Simple vitrage 4 mm (Ug=5,8, FSg=0,86)	5942,0928
FEN2 : Double vitrage 4/6air/4 (Ug=3,3, FSg=0,77)	7706,496
FEN3 : Double vitrage 4/16-air/4 (Ug=2,7, FSg=0,77)	8305,1136
FEN4 : Double vitrage 4/16-argon/4 (Ug=2,6, FSg=0,77)	10206,8736
FEN5 : Double vitrage 6/16-air/4+couche faible émissivité (Ug=1,4, FSg=0,58)	10658,7264
FEN6 : Double vitrage 6/16-argon/4+couche faible émissivité (Ug=1,2, FSg=0,58)	12559,9488
FEN7 : Double vitrage 6/16air/4 + contrôle solaire (Ug=2,65, FSg=0,29)	16626,0864
FEN8 : Double vitrage 6/16argon/4 + contrôle solaire (Ug=2,5, FSg=0,29)	18520,32

### 2.6.3 Application de la méthode des plans d'expériences

Pour déterminer le modèle polynomial, nous avons choisi comme exemple, un plan D-optimal avec une modélisation de deuxième ordre pour l'estimation des besoins de chauffage. Le plan D-optimal utilisé comporte 21 simulations au lieu des 4096 de l'étude paramétrique directe (Tableau 2-5).

Tableau 2-5 : Le plan D-optimal dans le cas de 5 paramètres et 2 niveaux.

N°	$U_m$	$U_t$	$U_p$	$U_w$	FS
1	-1	-1	1	-1	-1
2	-1	1	-1	1	1
3	0	0	0	1	1
4	-1	-1	-1	1	-1
5	1	1	-1	-1	1
6	0	1	1	-1	0
7	0	0	-1	0	-1
8	-1	1	1	1	-1
9	1	-1	-1	1	1
10	-1	-1	1	1	1
11	0	-1	0	0	1
12	1	-1	1	1	-1
13	1	0	1	-1	1
14	-1	1	1	-1	1
15	1	-1	-1	-1	0
16	1	1	1	0	1
17	-1	0	0	0	0
18	1	1	-1	1	0
19	-1	1	-1	-1	-1
20	-1	-1	-1	-1	1
21	1	1	0	-1	-1

Le modèle polynomial obtenu est le suivant :

$$\begin{aligned}
 Y_{ch} = & 92.22 + 20.74 \times U_m + 37.77 \times U_t + 0.03 \times U_p + 32.22 \times U_w - 11.75 \times g_w \\
 & + 0.67 \times U_m \times U_t + 1.07 \times U_m \times U_p + 0.27 \times U_m \times U_w - 0.66 \\
 & \times U_m \times g_w + 1.04 \times U_t \times U_p + 0.61 \times U_t \times U_w - 1.14 \times U_t \times g_w \\
 & + 0.7 \times U_p \times U_w - 0.48 \times U_p \times g_w - 0.85 \times U_w \times g_w - 0.25 \times U_w \\
 & \times U_w + 1.64 \times U_t \times U_t + 0.73 \times U_p \times U_p + 4.29 \times U_w \times U_w + 3.3 \\
 & \times g_w \times g_w
 \end{aligned} \tag{Eq.50}$$

La Figure 2-8 montre une comparaison entre les besoins de chauffage obtenue par le modèle polynomial du second degré calculé à partir du plan D-optimal, et celle obtenue par 500 simulations numériques supplémentaires réalisées avec des combinaisons aléatoires des valeurs des différents paramètres définis dans leurs domaines de variation, répartis dans tout le domaine expérimental.

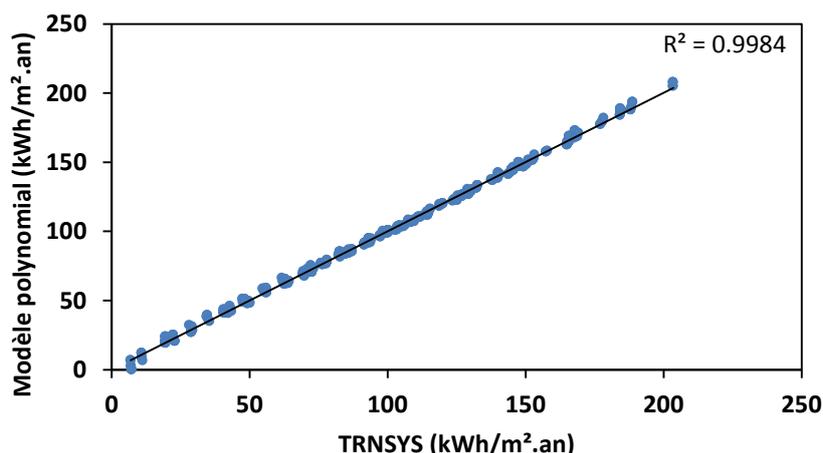


Figure 2-8 : Comparaison entre les résultats du modèle polynômial et les simulations numériques pour le plan D-optimal de 21 simulations.

On constate une très bonne cohérence entre le modèle polynômial et les simulations numériques avec un coefficient de régression de l'ordre de 0,9984. L'écart maximal entre les résultats obtenus par simulation et par la fonction polynômiale est 2,83 kWh/m².an. L'erreur relative moyenne est 1.5%. Finalement, l'écart type égale 0,91 kWh/m².an (tableau 2.8).

Les résultats de cet exemple simple sont encourageants. Ils montrent la capacité de la méthode des plans d'expériences à déterminer à l'aide d'un nombre limité de simulations des modèles polynômiaux d'une précision appréciable. Ces modèles polynômiaux peuvent donc servir à effectuer des études de sensibilité et d'optimisation.

#### 2.6.4 Analyse des résultats et comparaison

Après avoir calculé les besoins de chauffage et le coût d'investissement associé à toutes les combinaisons possibles dans le cas de la modélisation polynômiale, nous traçons le front de Pareto pour l'identification des meilleures solutions possibles du problème.

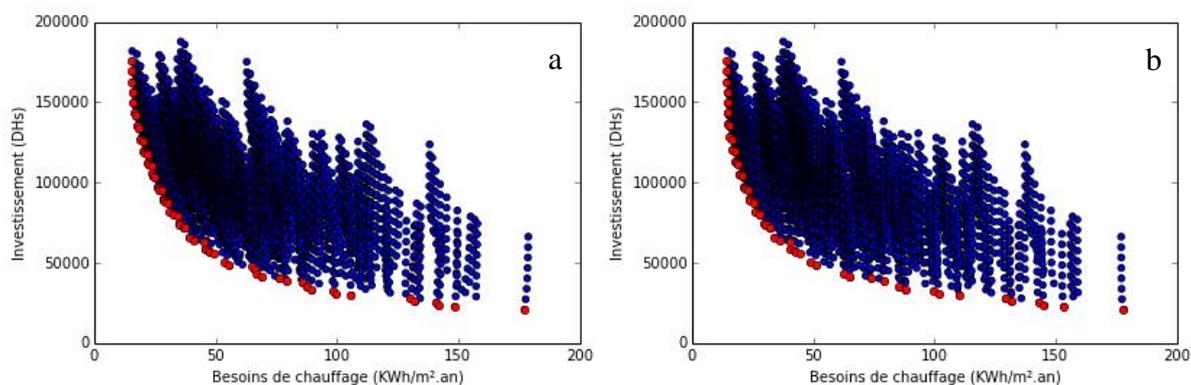


Figure 2-9 : Solution dominée et Front de Pareto calculé à partir: a) des simulations à l'aide de TRNSYS b) du modèle polynômial.

Les résultats présentés dans la Figure 2-9 montrent que la tendance et les comportements de la surface de compromis obtenus par les modèles polynômiaux et les simulations numériques

sont presque identiques. La solution compromis obtenu entre les besoins de chauffage et le coût d'investissement est la même avec légère différence est observé, d'environ 1.87 KWh/m<sup>2</sup>.an, entre les besoins de chauffage calculés par le modèle polynomial et ceux obtenus par les simulations Tableau 2-6. Une faible épaisseur d'isolation des murs extérieurs et de la toiture avec une fenêtre double vitrage à faible émissivité est largement suffisante pour obtenir un rapport meilleur rapport performance sur prix.

Tableau 2-6 : Comparaison entre la solution 'compromis' déterminée par l'étude paramétrique à l'aide de TRNSYS et celle obtenue par le modèle développé.

	Besoins en chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Coût d'investissement (DHs)	Epaisseur d'isolation des murs (cm)	Epaisseur d'isolation de la toiture (cm)	Epaisseur d'isolation du plancher (cm)	Type de fenêtre
Modèle polynomial	50,87	49 999,47	4	7	1	FEN 6
Etude paramétrique	49,00	49 999,47	4	7	1	FEN 6

Nous avons démontré que la méthode que nous avons développée permet de donner des résultats très satisfaisants. Les optimums globaux sont obtenus avec une précision très acceptable et avec un temps de calcul drastiquement réduit.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la problématique de l'aide à la décision multicritère dans le cas de la conception ou la réhabilitation des bâtiments. Les variables d'études et les différents critères permettant la contribution à des bâtiments durables ont été présentés. Afin de résoudre cette problématique, nous avons présenté un état de l'art sur les différentes méthodes d'aide à la décision multicritère et nous avons illustré les différentes anomalies de ces méthodes qui compliquent la tâche pour les concepteurs et les décideurs à prendre les décisions rationnelles dans un temps de calcul raisonnable.

Pour remédier à ces problématiques, une nouvelle méthode a été proposée. Elle est basée sur la méthode des plans d'expérience que nous avons présentée et l'approche de résolution de Front de Pareto. Afin d'évaluer l'efficacité de cette méthode, nous avons confronté nos résultats à ceux obtenus par des simulations numériques. La comparaison réalisée entre une étude paramétrique complète et l'utilisation des modèles polynomiaux a permis de conclure que cette dernière méthode peut être un outil très performant pour l'aide à la décision multicritère dans le cas de la conception ou la réhabilitation des bâtiments.

Les chapitres suivants seront consacrés à l'application de cette méthode pour d'autres conditions climatiques, d'autres typologies de bâtiment et avec une approche plus générale tenant compte de l'analyse de cycle de vie du bâtiment. Le but est de proposer des solutions rationnelles pour la conception des bâtiments neufs au Maroc et la réhabilitation des bâtiments existants en France.

---

## **Chapitre . 3 : Application à la conception des bâtiments neufs au Maroc**

---

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'appliquer la méthode que nous avons développée dans le chapitre précédent pour l'aide à la décision multicritère lors de la conception des bâtiments neufs au Maroc. L'objectif est de fournir des solutions techniques permettant de respecter les exigences thermiques réglementaires au Maroc tout en assurant le confort thermique d'été et d'hiver tout en réduisant les impacts économiques. Il est à noter que le manque de données sur les impacts environnementaux au Maroc nous a empêchés de les inclure dans notre étude d'optimisation.

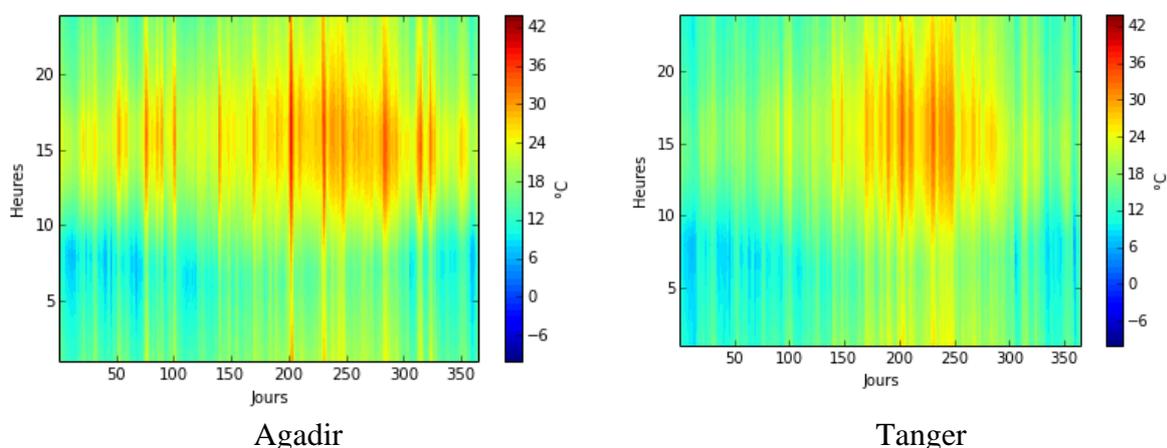
Le début de ce chapitre est consacré aux travaux de développement des modèles polynomiaux. Nous allons analyser le potentiel et les limites de la méthode des plans d'expériences pour déterminer, par le biais de la simulation numérique, des modèles polynomiaux pour l'évaluation des performances énergétiques et du confort thermique d'une maison individuelle typique au Maroc.

Ensuite, ces modèles seront mis en œuvre pour réaliser une étude de sensibilité des paramètres afin de sélectionner ceux qui ont une influence significative sur les performances énergétiques et le confort thermique d'été du bâtiment étudié. Le processus d'optimisation multicritère sera ensuite appliqué afin de concevoir un bâtiment durable pour les différentes zones climatiques marocaines (Figure 1-14).

### 3.2 Données météorologiques

Les besoins de chauffage et de refroidissement sont liés aux écarts de température, en période hivernale, entre l'intérieur et l'extérieur. Cet écart devient moins important en période estivale et a donc moins d'influence sur les besoins de refroidissement qui sont surtout liés aux apports solaires et aux gains internes. Il s'avère donc nécessaire de quantifier et d'analyser les paramètres météorologiques qui influencent les besoins énergétiques.

Comme nous l'avons présenté précédemment, le Maroc a été subdivisé en six zones climatiques. La Figure 3-1 présente la température extérieure annuelle de ces zones.



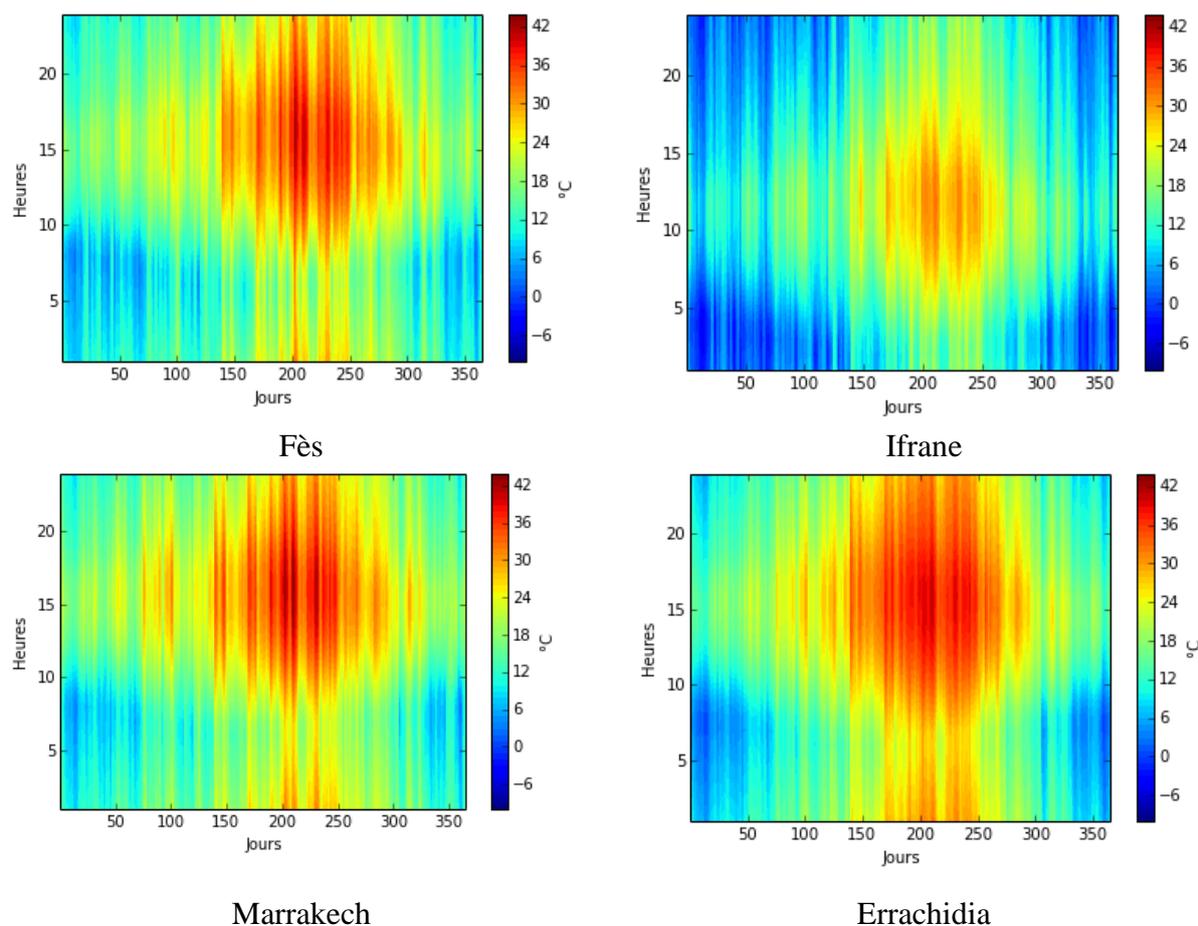


Figure 3-1 : Variation de la température extérieure pendant une année pour les six zones climatiques du Maroc

La température extérieure à Agadir est située dans la majorité des cas entre 18 et 25 °C. Ce qui prouve que dans cette ville le climat est plutôt confortable. Des pics de chaleur sont constatés pendant certains jours en été. À Tanger, les pics de chaleur sont moins présents et l'hiver est légèrement plus froid que celui d'Agadir. Le climat modéré de ces deux villes se justifie par l'humidité de l'air élevée dû à la proximité de la mer Méditerranéenne et de l'océan Atlantique à Tanger et de l'océan Atlantique à Agadir.

La ville d'Ifrane est située dans les montagnes du moyen Atlas à 1660 m d'altitude. Le climat en hiver est très froid avec une température aux alentours de 0°C surtout pendant la nuit et tôt le matin. En été, la température maximum est légèrement supérieure à 26 °C.

La ville de Fès est caractérisée par un été très chaud en été. L'hiver est moyennement froid du fait des masses d'air provenant de l'Atlas. Pour Marrakech, le climat est assez voisin, l'été est un peu plus chaud, l'hiver un peu moins froid qu'à Fès à cause des masses d'air chaud provenant du Sahara.

La ville d'Errachidia est caractérisée par une forte amplitude de température. En hiver et en mi-saison, la température peut varier de 4°C à 24 °C dans la même journée. En été, la

température est souvent supérieure à 26 °C. Ces caractéristiques sont dues principalement à sa localisation entre le haut Atlas et le Sahara.

La Figure 3-2 fournit les fréquences cumulées de la température de l'air extérieur pour les six villes représentant les six zones climatiques. La température minimale atteinte est de -5,75°C à Ifrane et la température maximale atteinte est de 43,28°C à Marrakech.

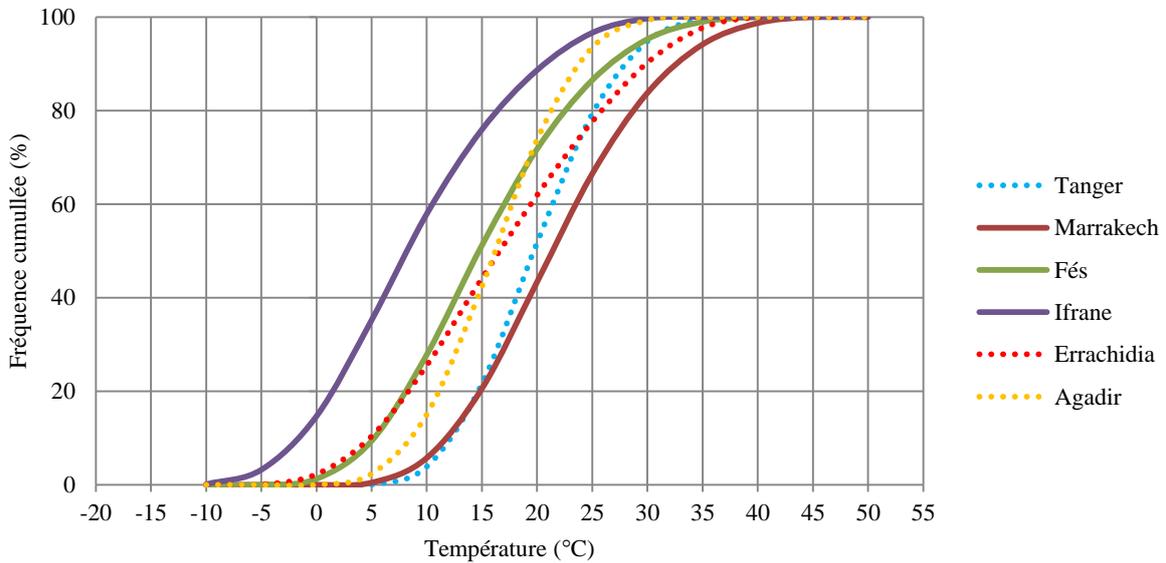


Figure 3-2 : Fréquences cumulées annuelles de la température extérieure des climats étudiés.

Ces analyses se traduisent par une valeur des degrés-heures de chauffage pour une base à 20°C maximales à Ifrane (81062 DHCH), moyennes à Fès (38469 DHCH) et minimale à Agadir (24761 DHCH). Notons que Tanger se situe entre Errachidia et Marrakech avec 32552 DHCH comme le montre la Figure 3-3.

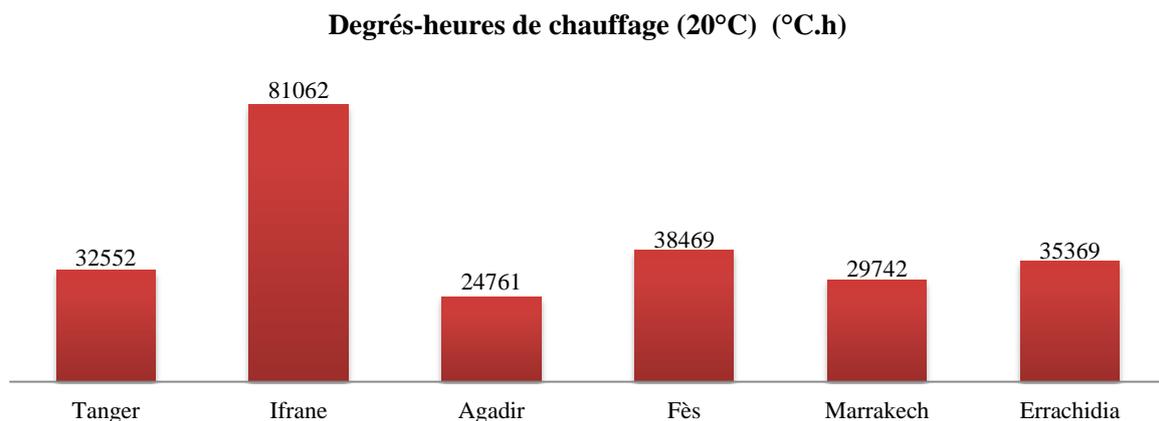


Figure 3-3 : Nombre de degrés heures de chauffage des six zones climatiques du Maroc.

Concernant les degrés-heures de rafraîchissement pour une base à 26°C, la ville d'Errachidia présente le nombre maximal (12121 DHCL), et la ville d'Ifrane le nombre minimal (839 DHCL) (Figure 3-4).

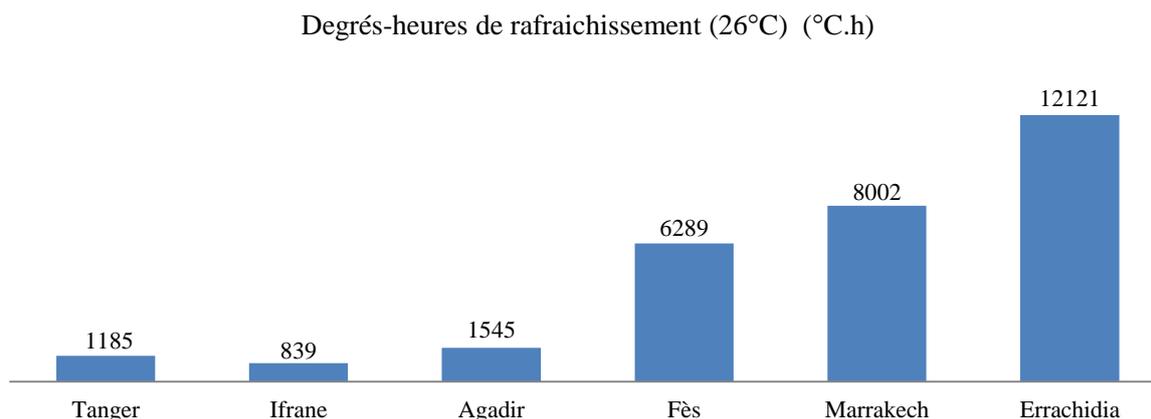


Figure 3-4 : Nombre de degrés heures de rafraîchissement des six zones climatiques du Maroc.

### 3.3 Description du bâtiment étudié

#### 3.3.1 Géométrie

Les bâtiments modernes au Maroc sont soit des villas, souvent situées dans des zones résidentielles séparées des immeubles urbains ou des maisons individuelles typiques qui peuvent avoir jusqu'à quatre étages.

Le bâtiment sélectionné pour notre étude est une maison individuelle typique représentant l'architecture moderne au Maroc illustrée par les travaux de (Tove Brunzell, Sanaa Duric, 2012). La maison est d'une superficie de 100 m<sup>2</sup>, avec une hauteur sous plafond de 2,8 m. Elle est composée d'un rez-de-chaussée et d'un étage courant. Chaque niveau possède 4 pièces et un couloir (Figure 3-5). Le taux global des baies vitrées est de 15%. Les façades vitrées sont réparties sur les parois extérieures Est, Sud et Ouest.

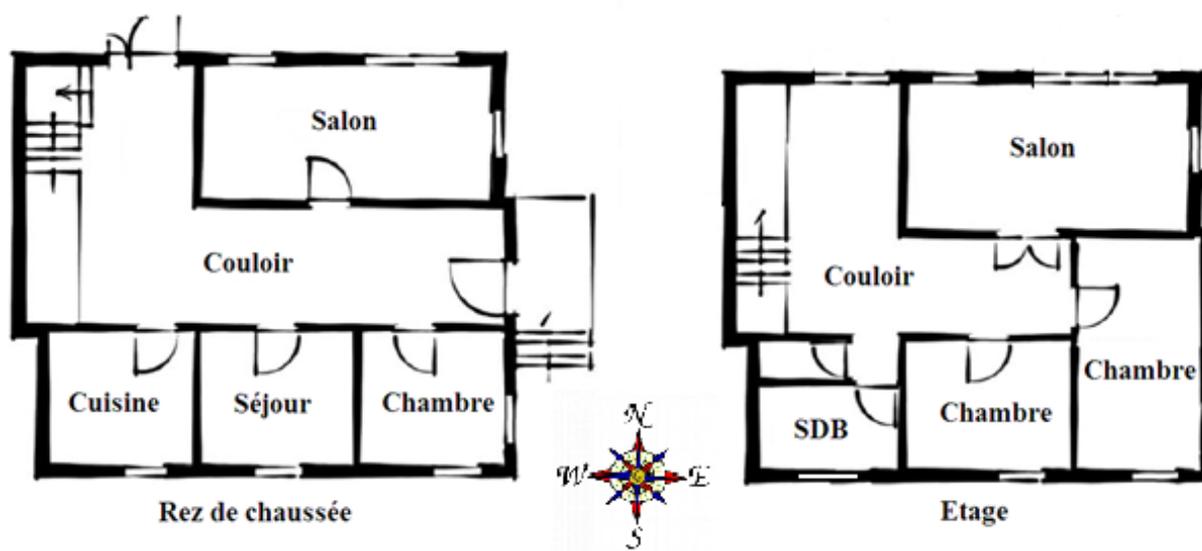


Figure 3-5 : Plan du Rez-de-chaussée et de l'étage du bâtiment étudié

### 3.3.2 Découpage en zones du bâtiment

Chaque étage du bâtiment est divisé en cinq zones thermiques. La température de l'air est supposée uniforme dans chaque zone. Le nombre total de zones thermiques au niveau du bâtiment est de 10 (Figure 3-6). La géométrie du bâtiment a été saisie par le logiciel Google Sketchup et ensuite enregistrée à l'aide d'un plug-in Trnsys 3d et qui peut être importée par Trnsys studio version 17. Cela permet un calcul plus rapide et plus précis.

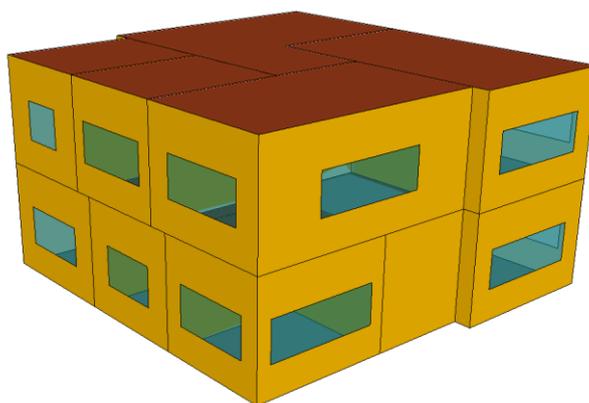


Figure 3-6 : Modélisation du bâtiment sous Trnsys 3d

### 3.3.3 Données de modélisation et scénario d'usage

Après avoir modélisé la géométrie du bâtiment, les caractéristiques de son enveloppe et ses systèmes énergétiques, les scénarios de son usage doivent être définis. Nous avons utilisé une configuration dite de référence pour pouvoir évaluer un cas de base pour déterminer par la suite le potentiel d'économie d'énergie par l'étude d'optimisation. Ce cas de base correspond aux pratiques de construction des bâtiments neufs au Maroc. Les caractéristiques de l'enveloppe sont celles données dans le Tableau 1-8.

Le plancher bas est posé directement sur le sol. La modélisation du transfert thermique est effectuée en se basant sur la norme NF EN ISO 13370 et le type 77 de Trnsys. Nous supposons que le bâtiment est ventilé avec un débit de 0,3 v/h afin d'assurer un renouvellement d'air suffisant pour le confort hygiénique. Ce débit est calculé à partir de la norme DTU 68.1. Nous supposons aussi que le niveau d'étanchéité à l'air du bâtiment est dans un état médiocre en se basant sur la norme NF EN 12831. En effet, le taux de renouvellement d'air dû aux infiltrations est égal à 1,15 v/h (sous une différence de pression de 4 Pa) dans le cas du bâtiment de référence.

Le bâtiment est occupé par cinq personnes. Chaque occupant a une activité légère, ce qui se traduit par une chaleur sensible et latente de 75 W chacun. Les chambres sont occupées chaque jour entre 22h et 7h 30 min. Le séjour est utilisé pour le repos pendant la journée et le soir, la période d'occupation est de 13h et à 18h (deux personnes) et entre 20h et 22h le soir (cinq personnes). La cuisine est occupée entre 7h 30 min et 12h ainsi que entre 18 h et 19 h par deux personnes et de 12h à 13h et de 19h à 20h par cinq personnes.

Un mode de gestion de l'éclairage est utilisé. L'éclairage artificiel n'est allumé que lorsque l'éclairement est inférieur à 300 lux. Dans le cas contraire, l'éclairage naturel est suffisant. La

puissance installée d'éclairage est 5W/m<sup>2</sup>. Le type de lampe est incandescent. Les autres appareils produisant des charges internes dans le bâtiment sont présentés dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Charges internes des appareils

Type d'équipement	Puissance sensible moyenne	Horaire
TV	75 W	Du lundi au dimanche : de 13 h à 18 h et de 20 h à 22 h
Ordinateur	125 W	Du lundi au vendredi : de 20 h à 22 h Samedi et dimanche : de 14 h à 22 h
Réfrigérateur	125 W	En permanence

### 3.4 Evaluation des performances énergétiques

#### 3.4.1 Evaluation des besoins de chauffage et de refroidissement

Les performances énergétiques du bâtiment pour la configuration de référence ont été évaluées à l'aide des simulations numériques en tenant compte des différents climats définis par la RTCM. Les besoins de chauffage et de refroidissement ainsi que l'énergie finale sont présentés dans la Figure 3-7.

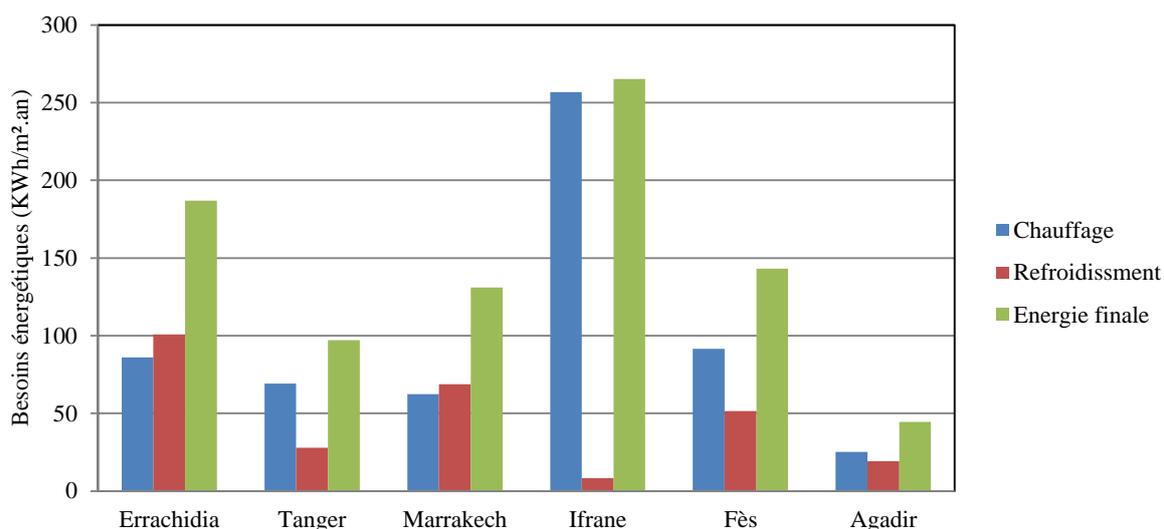


Figure 3-7 : Besoins de chauffage, de refroidissement et en énergie finale du bâtiment de référence dans les six zones climatiques.

Nous constatons que le bâtiment de référence est très influencé par les données climatiques à cause de la valeur faible de la résistance thermique de son enveloppe et du taux élevé de renouvellement d'air. Les résultats montrent que les besoins de chauffage sont très élevés à Ifrane (de l'ordre de 256 kWh/m<sup>2</sup>.an). En revanche, les besoins de refroidissement y sont très faibles.

À Errachidia et Marrakech, les besoins de refroidissement sont élevés mais aussi légèrement supérieurs aux besoins de chauffage. L'énergie finale dans ces deux villes est de l'ordre de 186 kWh/m<sup>2</sup>.an et 131 kWh/m<sup>2</sup>.an respectivement. A Agadir les besoins énergétiques sont faibles d'environ 44 kWh/m<sup>2</sup>.an. À Fès et Tanger, les besoins de chauffage représentent

environ le double des besoins de refroidissement. Les besoins en énergie finale sont de l'ordre de 143 à Fès et 97 kWh/m<sup>2</sup>.an respectivement. Nous comparons ces résultats avec les limites réglementaires du RTCM. Le Tableau 3-2 montre le pourcentage de réduction qui doit être envisagé afin de respecter les exigences du RTCM.

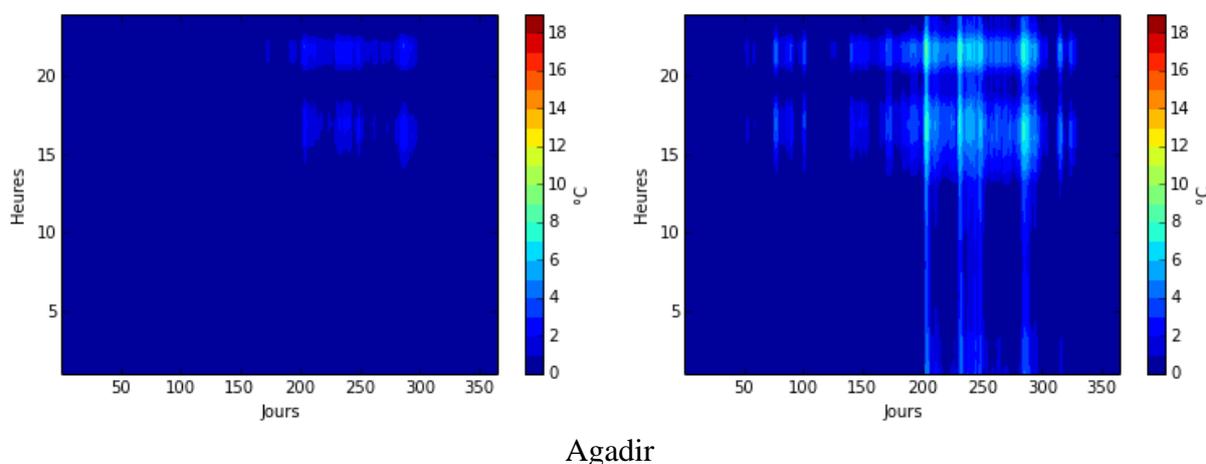
Tableau 3-2 : Pourcentage de réduction des besoins d'énergie finale du bâtiment de référence par rapport aux limites réglementaires.

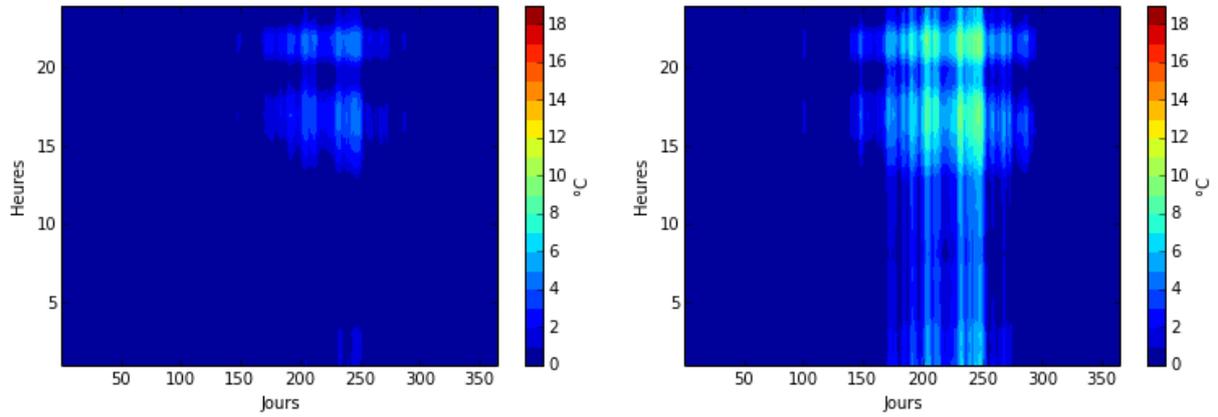
Zone climatique	Différence des besoins d'énergie finale entre le bâtiment de référence et la limite réglementaire	Pourcentage de réduction à envisager
Agadir	4 kWh/m <sup>2</sup> .an	9,1 %
Tanger	51,05 kWh/m <sup>2</sup> .an	52,6 %
Fès	95,05 kWh/m <sup>2</sup> .an	66,44 %
Ifrane	201,1 kWh/m <sup>2</sup> .an	75,85 %
Marrakech	67,11 kWh/m <sup>2</sup> .an	51,18 %
Errachidia	121,83 kWh/m <sup>2</sup> .an	65,21 %

La différence entre les besoins d'énergie finale du bâtiment de référence et la limite réglementaire montre que pour la zone d'Agadir des solutions techniques simples peuvent être suffisantes pour atteindre les objectifs fixés par ma RTCM. Pour les autres villes, des solutions techniques performantes s'avèrent nécessaires pour la réduction de plus de 50% des besoins d'énergie finale.

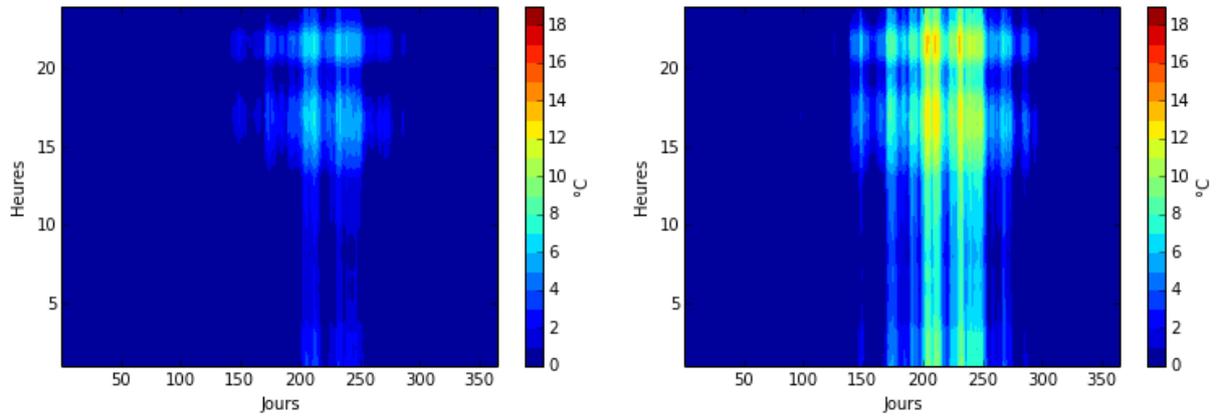
### 3.4.2 Evaluation du confort thermique d'été

L'évaluation du confort thermique d'été est nécessaire surtout dans les pays du sud de la Méditerranée comme le Maroc. L'approche adaptative présentée dans le chapitre 2 est alors utilisée. Afin de mieux comprendre la différence entre les degrés heures conventionnels basés sur la température de consigne de 26 °C pour le refroidissement et les degrés heures calculés à l'aide de l'approche adaptative, nous comparons dans la Figure 3-8 ces deux indicateurs. La température opérative de calcul choisie est celle de la pièce dont la somme des degrés heures est la plus élevée. Dans le cas de notre bâtiment de référence, c'est le séjour, car c'est la pièce qui possède le plus de charges internes.

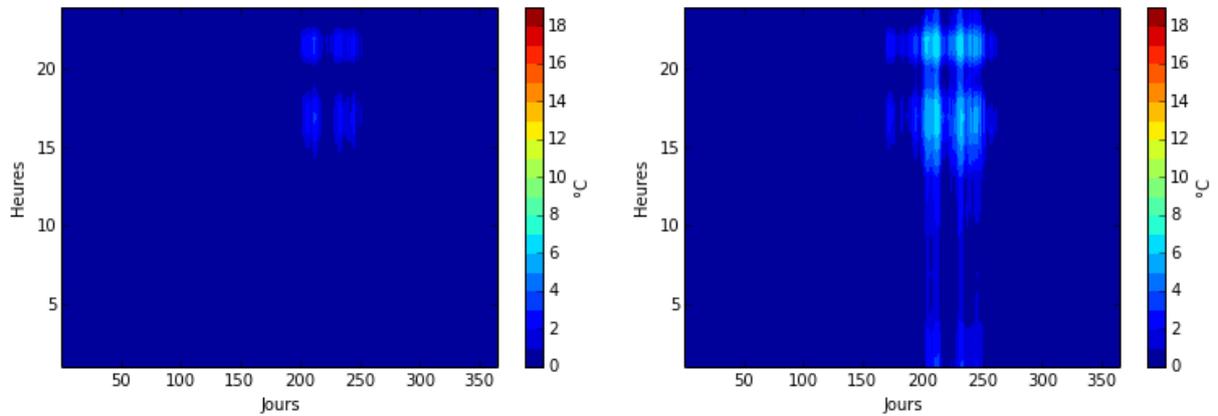




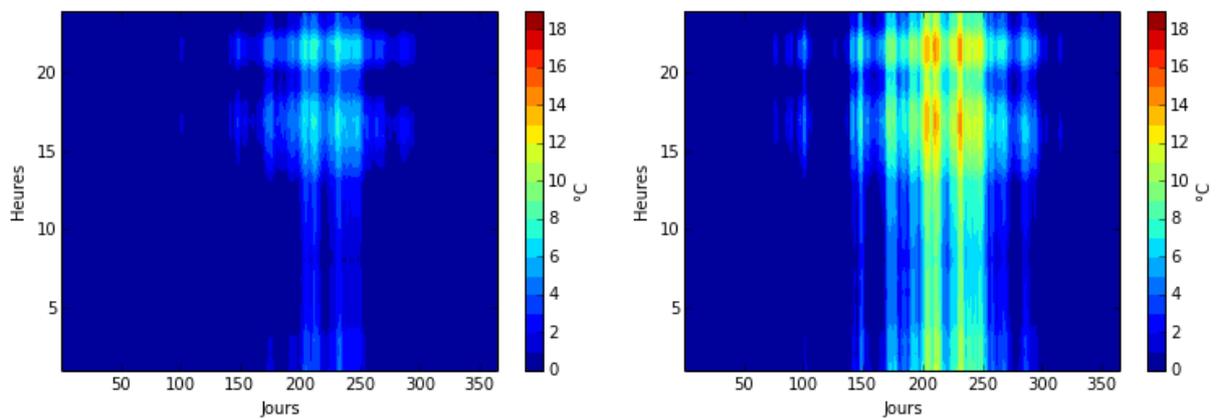
Tanger



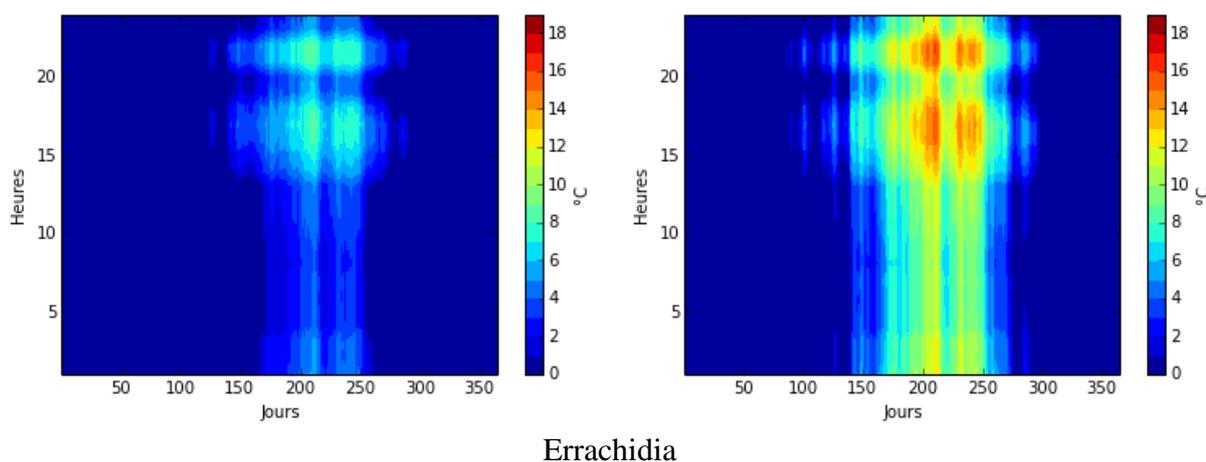
Fès



Ifrane



Marrakech



Errachidia

Figure 3-8 : Degrés heures de rafraîchissement calculés par l'approche adaptative (à gauche) et par l'approche conventionnelle (à droite) pour les six zones climatiques du Maroc (la température de consigne est 26°C)

Nous remarquons que les degrés heures de rafraîchissement calculés par l'approche adaptative sont beaucoup moins élevés que ceux de l'approche basée sur la température de consigne. Les degrés heures élevés de rafraîchissement sont constatés entre 12h et 19h, ce qui correspond à la période où le rayonnement solaire est élevé. Des surchauffes sont aussi ressenties entre 20h et 22h pour la période où 5 occupants sont rassemblés dans le séjour. La somme des degrés heures de rafraîchissement calculés par l'approche adaptative est très faible à Ifrane et à Agadir et elle est de l'ordre de 385 °C.h et 692 °C.h respectivement. Cette somme est de 820 °C.h pour la ville de Tanger. Les villes de Fès, de Marrakech et Errachidia ne sont pas confortables en été. À Errachidia la période d'inconfort s'étale sur les 3 mois d'été avec une somme de degrés heures de rafraîchissement de l'ordre de 9380 °C.h. Cette période est moins longue à Fès et Marrakech, mais on constate des pics de chaleur élevée. La somme de degrés heures de rafraîchissement de ces deux villes est de l'ordre de 3947 °C.h et 5443 °C.h respectivement. Dans le cas de cette configuration dite de référence, nous pouvons conclure que les systèmes de refroidissement sont largement recommandés dans ces trois dernières villes. Les bâtiments des villes côtières et Ifrane peuvent être dispensés de ces systèmes.

### 3.4.3 Effet de l'orientation

L'orientation reste parmi les paramètres qui ont un impact important sur la conception des bâtiments neufs. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, ce paramètre reste très dépendant de l'achat de terrain et donc il n'y a pas souvent de liberté de choix concernant ce paramètre. Ceci n'empêche pas de réaliser une étude permettant d'évaluer le potentiel de réduction des besoins énergétiques en fonction de l'orientation. Nous varions l'orientation de 10° et nous calculons les besoins de chauffage, les besoins de refroidissement et les besoins d'énergie finale pour les six zones climatiques (Figure 3-9).

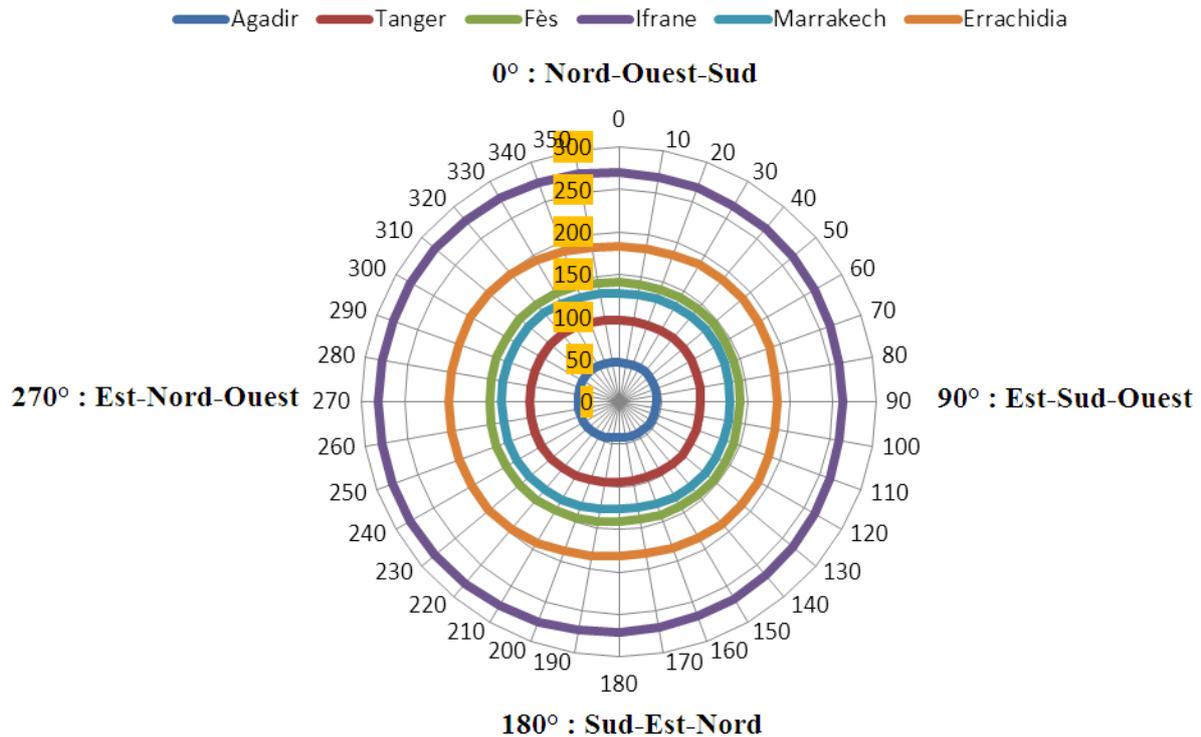


Figure 3-9 : Effet de l'orientation sur les besoins d'énergie finale pour les six zones climatiques du Maroc.

Selon les résultats de la figure 3-9, nous remarquons que, la meilleure orientation pour la ville d'Ifrane est Est-Sud-Ouest. Ceci permet de bénéficier du rayonnement solaire en hiver par les trois façades Sud, Est et Ouest. Pour les autres villes, l'orientation Nord-Est-Sud est celle qui nécessite le moins de besoins en énergie finale. Ceci s'explique d'une part par l'intensité élevée du rayonnement solaire sur la façade Ouest par rapport à celle de l'Est. Et d'autre part, la présence de la façade d'orientation Nord qui ne reçoit pas de rayonnement solaire. On peut conclure alors que le choix d'une orientation adéquate du bâtiment permet de réduire d'environ 10% (en moyen 10 kWh/m<sup>2</sup>.an) des besoins d'énergie finale.

#### 3.4.4 Effet de la surface vitrée

Le Taux Global des Baies Vitrées (TGBV) est souvent décidé par l'Architecte en prenant en considération les préférences du propriétaire et des critères du confort thermique et visuel. Nous proposons une étude paramétrique en faisant varier le TGBV pour analyser l'influence des surfaces vitrées sur les besoins énergétiques du bâtiment de référence. Trois TGBV ont été étudiés à savoir 15%, 25% et 35%.

La Figure 3-10 montre que l'augmentation des surfaces vitrées n'a pas trop d'influence sur les besoins de chauffage vu l'orientation de ce bâtiment à l'exception d'Ifrane. Dans cette ville, les façades vitrées sont très déperditives en hiver. Par ailleurs, une influence significative est constatée sur les besoins de refroidissement dans toutes les zones climatiques, car le rayonnement solaire est élevé surtout sur les façades Est et Ouest en été. Généralement, les besoins de refroidissement dépassent les besoins de chauffage lorsque le taux de surfaces

vitrées est supérieur 25% à Tanger, Agadir et Fès. Ces besoins doublent et même triplent lorsqu'on dépasse 25% et à 35 % à Marrakech et Errachidia respectivement.

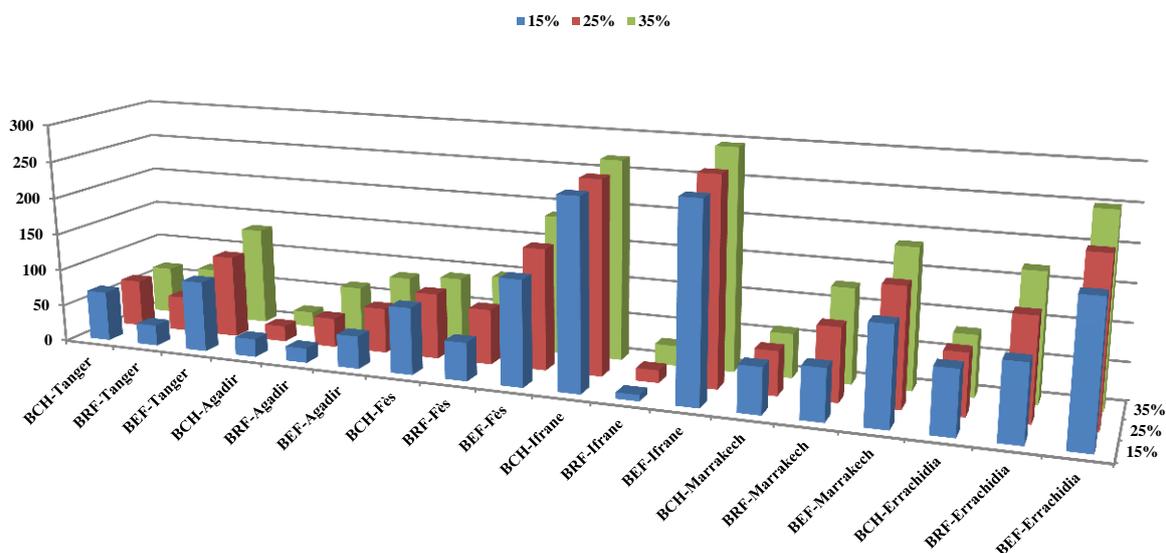


Figure 3-10 : Effet du taux de surfaces vitrées sur les besoins énergétiques pour les six zones climatiques du Maroc.

### 3.5 Définition des niveaux des paramètres d'étude

Les paramètres de conception choisis ainsi que leurs valeurs minimales et maximales pour le développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins énergétiques sont présentés dans le Tableau 3-3.

L'intervalle de variation de chaque paramètre est défini entre un niveau bas représenté par (-1) et un niveau haut représenté par (+1) en coordonnées centrées réduites.

Le niveau haut des coefficients de transmission thermiques des murs extérieurs, de la toiture, et du plancher correspond à la configuration de référence. Le niveau bas est choisi par rapport aux exigences des labels européens présentés dans le chapitre 1. L'épaisseur maximale de l'isolation dans les murs et la toiture est 22 cm. Alors que pour le plancher, elle est de 10 cm.

Le niveau haut du coefficient de transmission linéique des ponts thermiques correspond au cas où il n'y a pas de traitement thermique en se référant à la norme ISO EN 10211.

Concernant les baies vitrées, le niveau haut des coefficients de transmission thermique et le facteur solaire des vitrages correspondent à un simple vitrage largement utilisé dans les bâtiments au Maroc. Afin de représenter des vitrages à haute performance, les caractéristiques d'une fenêtre pariétodynamique avec éventuellement des masques ou des contrôles solaires ont été choisies comme niveau bas. Le coefficient de transmission du cadre varie d'un niveau haut dans le cas d'un matériau en aluminium et le niveau bas correspond à un cadre en bois.

Les coefficients d'absorptions solaires des surfaces extérieures opaques varient entre 0,1 et 0,9 selon la peinture existante dans le marché de construction.

Les niveaux haut et bas du taux de renouvellement d'air par infiltration sont calculés selon la norme NF EN 12831 et ils correspondent respectivement à des défauts d'étanchéité élevés et faibles. Le débit de ventilation varie entre un débit assuré par une ventilation simple flux et une ventilation double flux avec un rendement de récupération de 0,9.

Le taux du renouvellement d'air lié à la surventilation mécanique nocturne ( $q_{survent}$ ) est nul pour le niveau (-1), et il est égal à 5 vol/h pour le niveau (+1).

Tableau 3-3 : Les valeurs minimales et maximales retenues pour chaque paramètre d'étude.

	Symbole	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)	Unité
Coefficient de transmission des murs extérieurs	$U_m$	0,159	1,166	W/m <sup>2</sup> .K
Coefficient d'absorption solaire des murs extérieurs	$\alpha_m$	0,1	0,9	-
Coefficient de transmission de la toiture	$U_t$	0,163	1,88	W/m <sup>2</sup> .K
Coefficient d'absorption de la toiture	$\alpha_t$	0,1	0,9	-
Coefficient de transmission du plancher-bas	$U_p$	0,357	3,62	W/m <sup>2</sup> .K
Coefficient de transmission linéique des ponts thermiques	$\Psi_{pt}$	0,01	1	W/m.K
Coefficient de transmission des vitrages orientés Sud	$U_{g-s}$	0,1	5,8	W/m <sup>2</sup> .K
Facteur solaire des vitrages orientés Sud	$FS_{g-s}$	0,05	0,9	-
Coefficient de transmission des vitrages orientés Est	$U_{g-e}$	0,1	5,8	W/m <sup>2</sup> .K
Facteur solaire des vitrages orientés Est	$FS_{g-e}$	0,05	0,9	-
Coefficient de transmission des vitrages orientés Ouest	$U_{g-o}$	0,1	5,8	W/m <sup>2</sup> .K
Facteur solaire des vitrages orientés Ouest	$FS_{g-o}$	0,05	0,9	-
Coefficient de transmission des cadres des fenêtres	$U_f$	1,3	4,3	W/m <sup>2</sup> .K
Coefficient d'absorption des cadres des fenêtres	$\alpha_f$	0,1	0,9	-
Taux d'infiltration d'air	$q_{inf}$	0,35	1,15	v/h
Taux de ventilation mécanique	$q_{vent}$	0,03	0,3	v/h
Taux de surventilation mécanique nocturne	$q_{survent}$	0	5	v/h

### 3.6 Application de la méthode des plans d'expériences

Si on considère une étude paramétrique complète pour les 17 paramètres sélectionnés, le nombre de combinaisons possibles si on considère deux valeurs pour chaque paramètre est de

129 140 163 ( $3^{17}$ ). Dans notre cas le temps de calcul pour une simulation est 1 minute, il va falloir donc 10 ans de temps de calcul. Ce nombre colossal est évidemment impossible à mettre en œuvre. Les plans d'expérience de type D-optimaux permettent de réduire drastiquement le nombre de simulations comme le montre le

Tableau 3-4 pour chaque modèle polynomial. Les plans d'expérience sont présentés en Annexe 2-1, 2-2, 2-3, et 2-4.

Tableau 3-4. Nombre de simulations réduit par les plans D-optimaux pour chaque modèle polynomial.

Type de polynôme	Modèle linéaire	Modèle quadratique	Modèle linéaire avec interactions	Modèle quadratique complet
Nombre de simulations réduit par les plans D-optimaux	18	35	254	271

Le nombre maximal de simulations est celui du plan quadratique complet. Le temps de simulation dans ce cas est 4h 51 min avec un seul processeur. Ce temps se réduit à 56 minutes si on utilise 8 processeurs (les ordinateurs les plus utilisés à nos jours).

### 3.6.1 Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de chauffage

Les besoins de chauffage ont été modélisés à l'aide des quatre modèles polynomiaux définis précédemment dans la partie 2.5.2.2 en considérant les six zones climatiques marocaines. La saison de chauffage est considérée entre le 01 Novembre et 01 Mars. Pour la validation de ces modèles, 100 simulations supplémentaires ont été effectuées pour chaque climat. La combinaison des niveaux des paramètres étudiés est choisie d'une manière aléatoire.

Les Figure 3-11, Figure 3-12, Figure 3-13, Figure 3-14, Figure 3-15 et Figure 3-16 présentent les résultats obtenus pour les besoins de chauffage dans les six zones climatiques marocaines. Une comparaison entre les besoins de chauffage obtenus par les modèles polynomiaux et les simulations numériques est présentée pour chacune des zones climatiques.

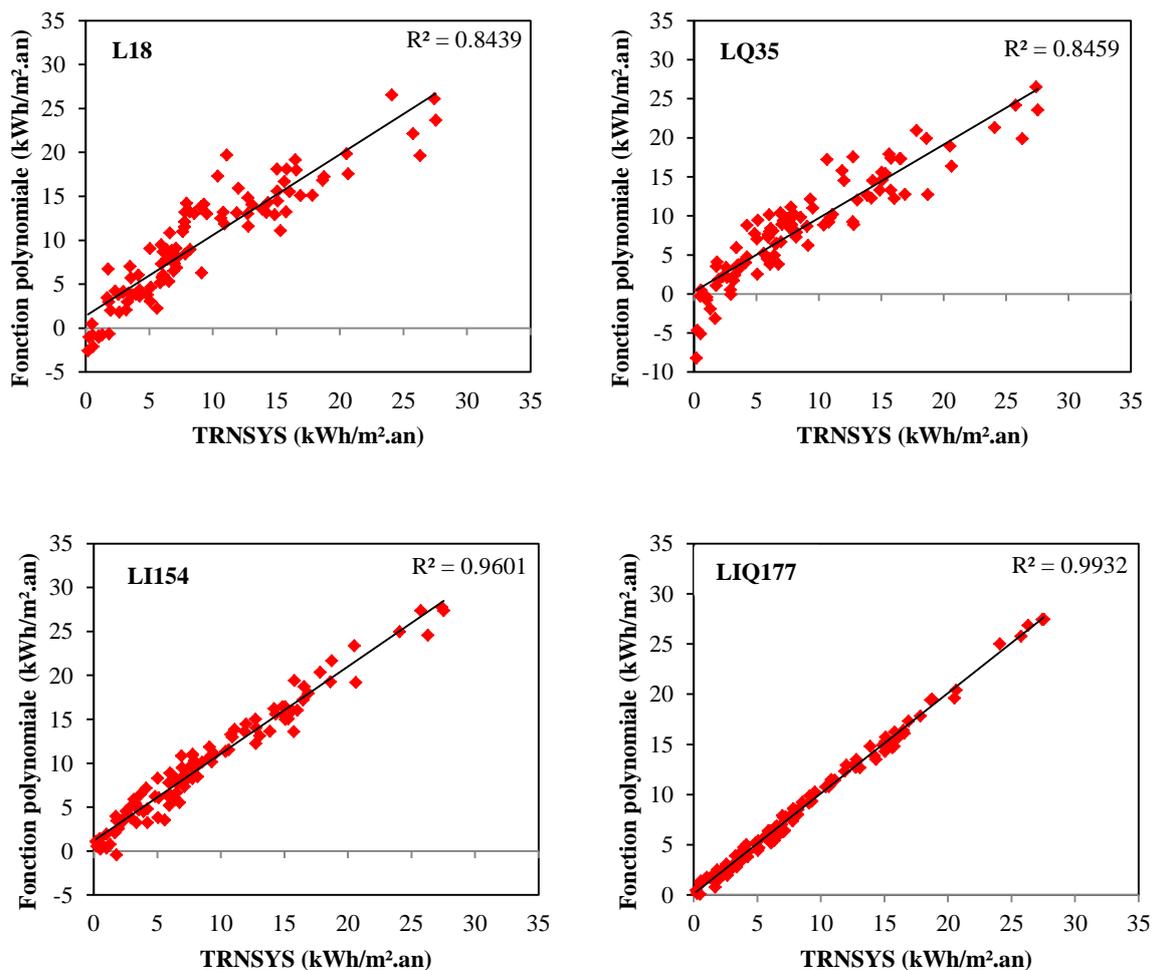
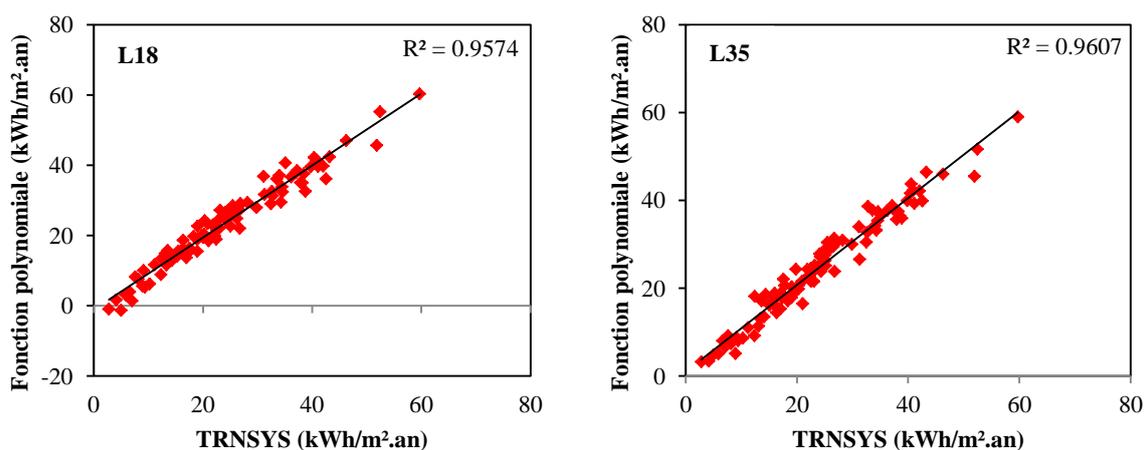


Figure 3-11 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Agadir



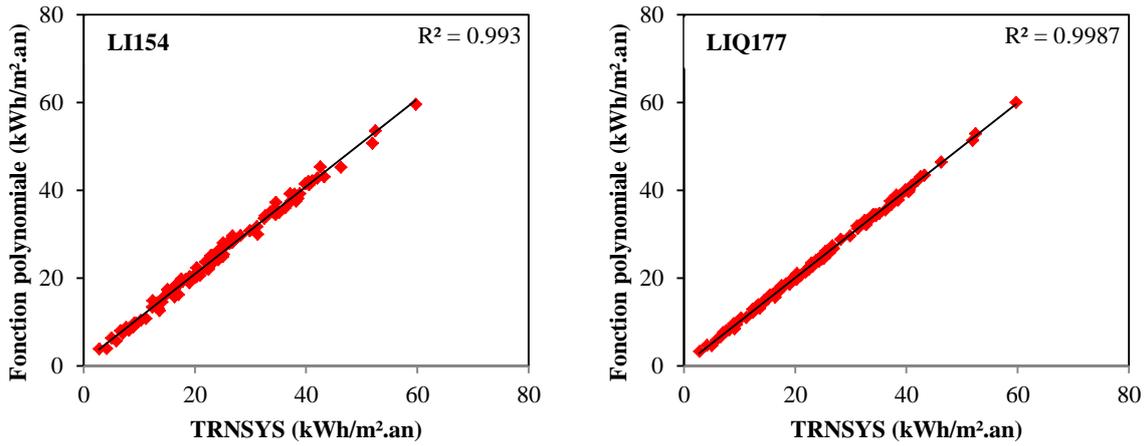


Figure 3-12 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Tanger

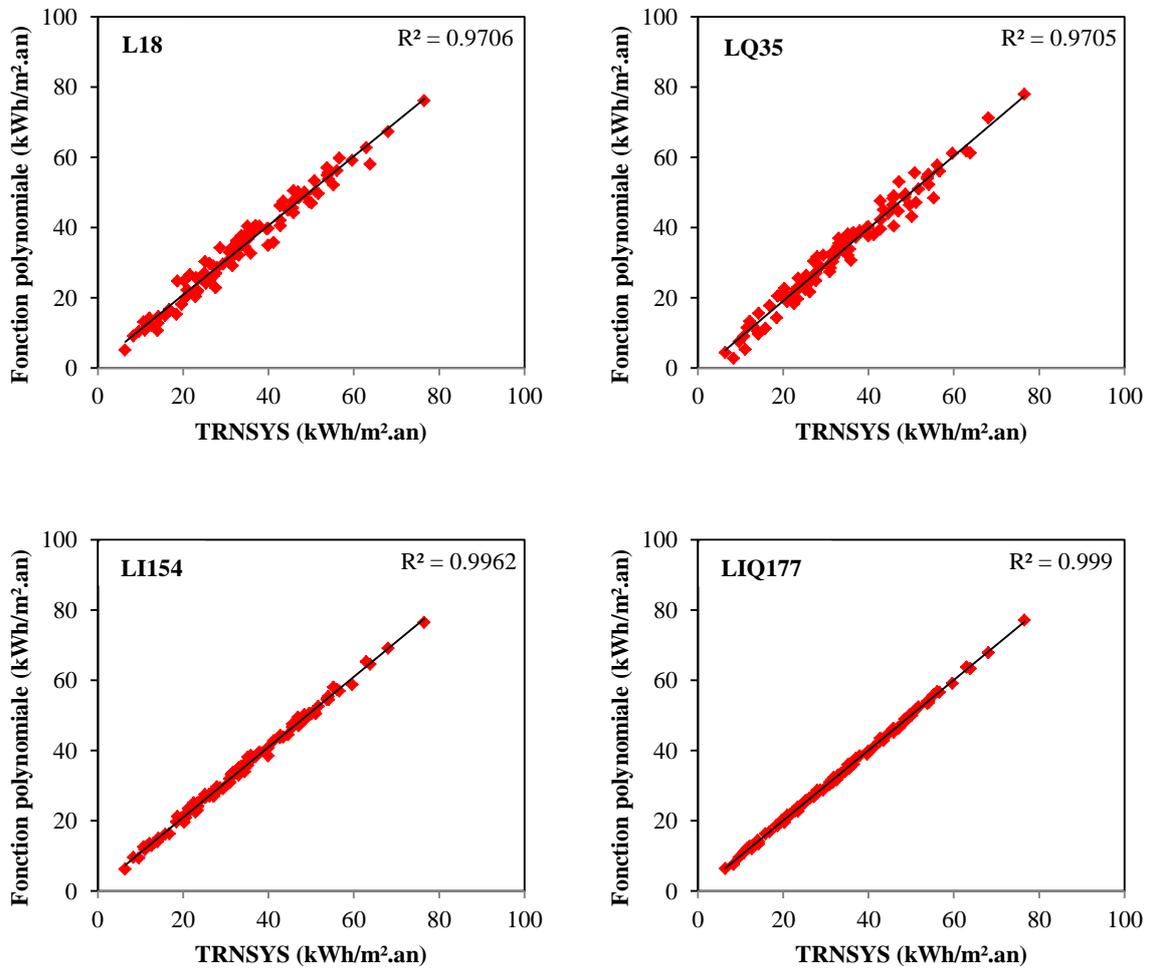


Figure 3-13 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Fès

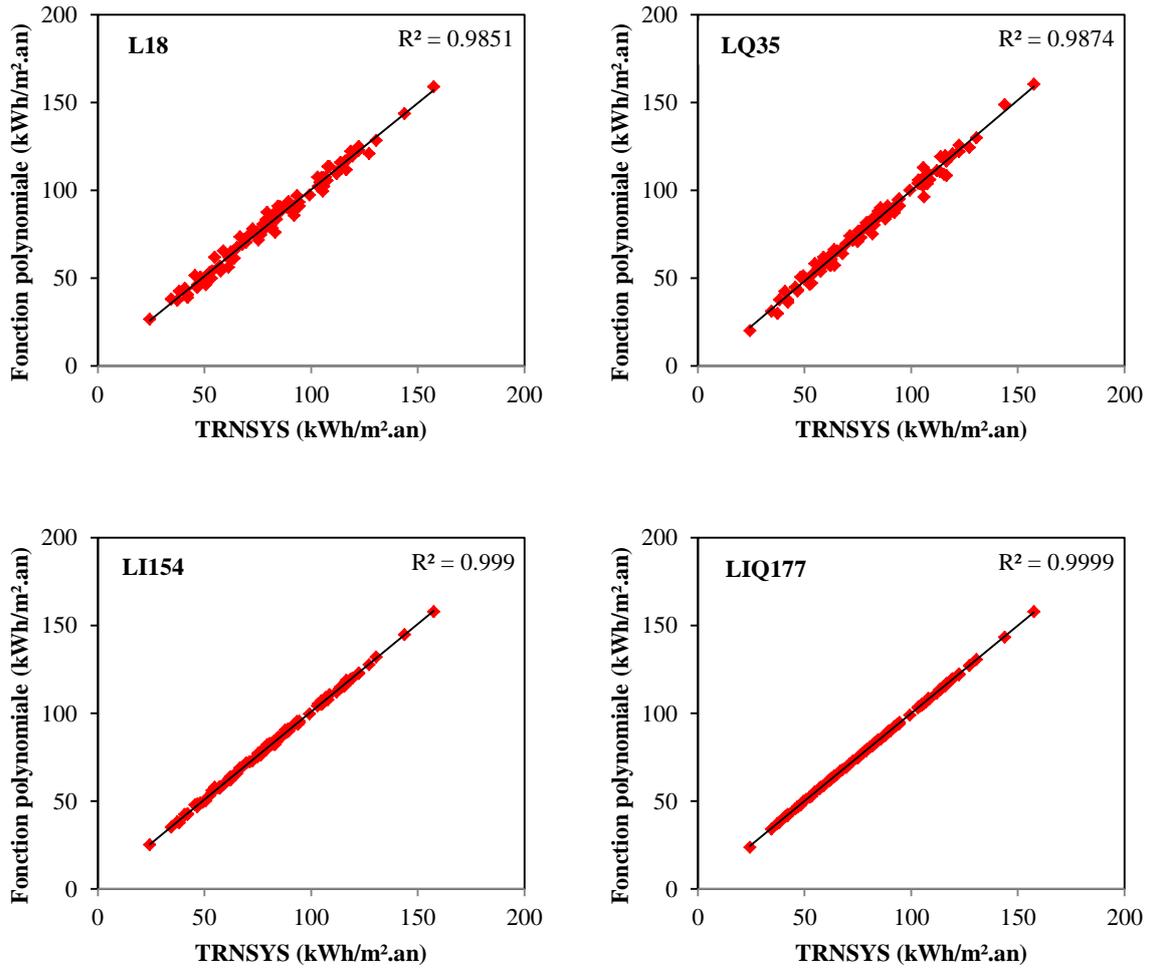
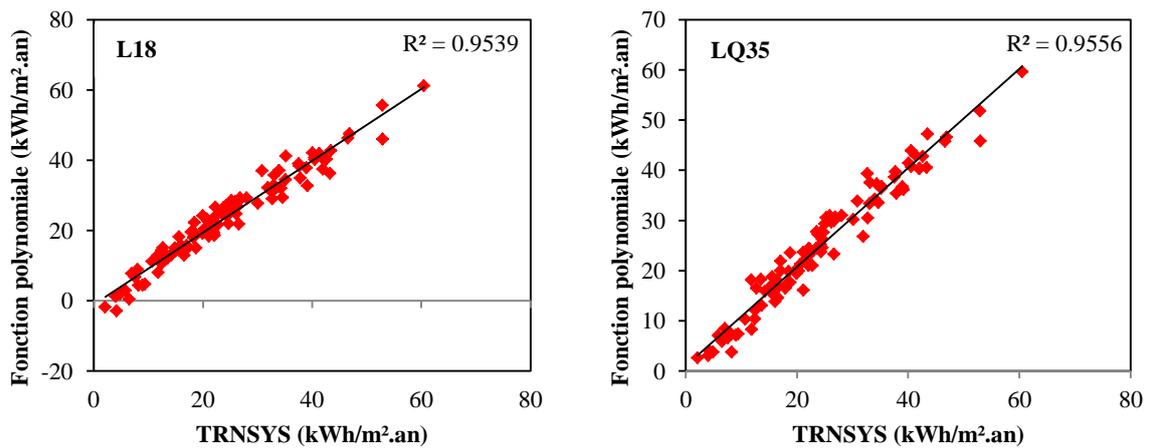


Figure 3-14 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Ifrane



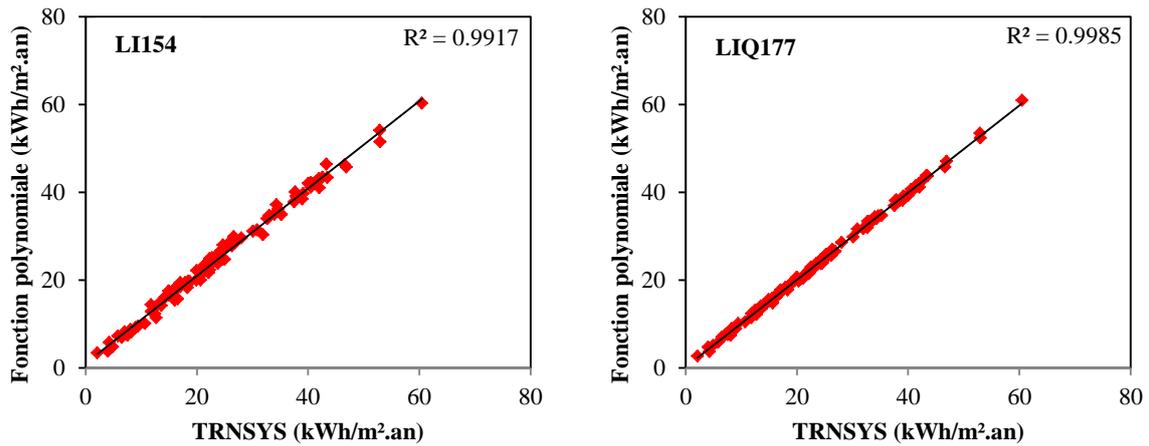


Figure 3-15 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Marrakech

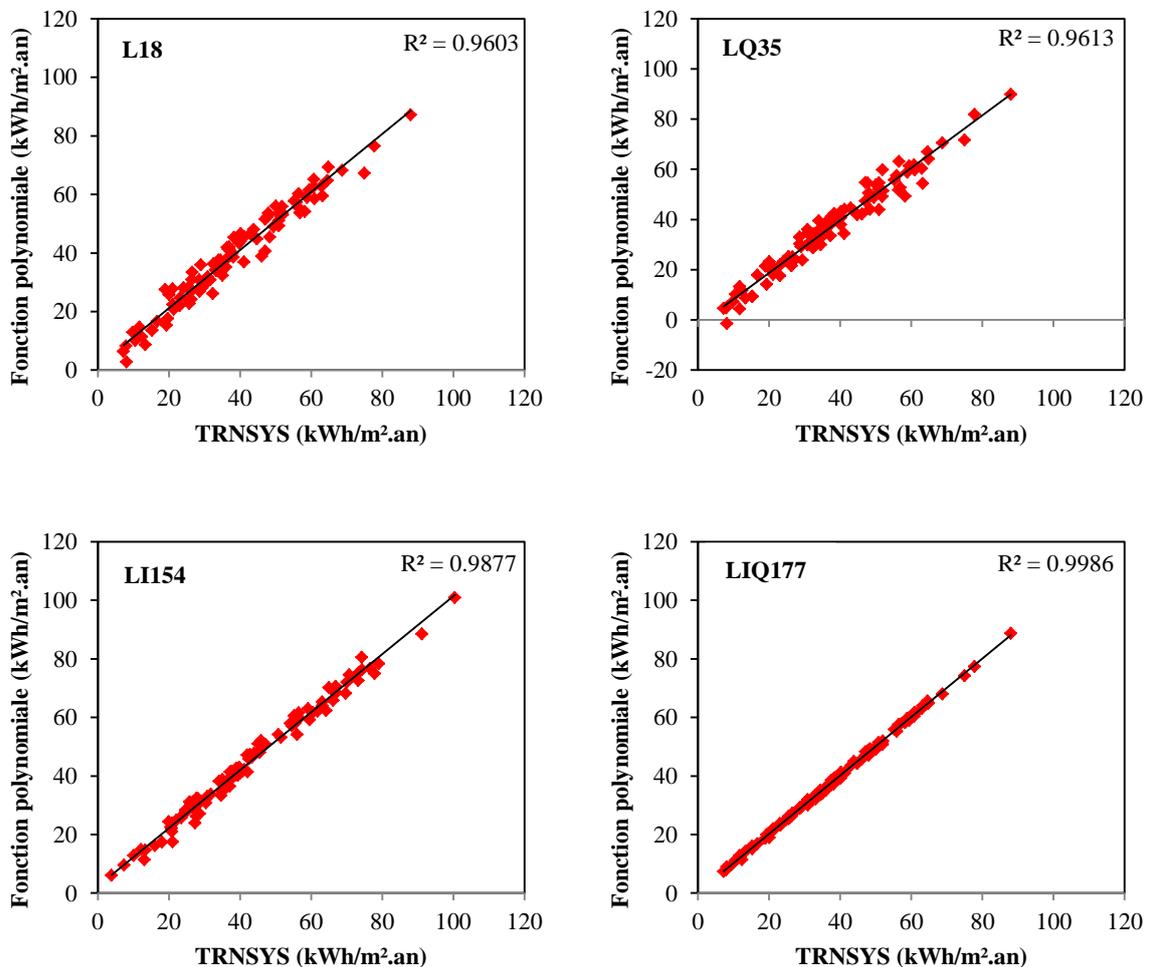


Figure 3-16 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Errachidia

Nous constatons que les modèles linéaires et purement quadratique ne permettent pas une très bonne prédiction des besoins de chauffage. La prise en compte des interactions entre les paramètres est nécessaire pour améliorer la précision de la prédiction. Elle permet d'augmenter le coefficient de régression jusqu'à 0.98 dans la majorité des cas. Pour une meilleure précision, le modèle quadratique complet permet alors une prédiction satisfaisante avec un coefficient de régression de l'ordre de 0.99. Ce qui indique une très bonne corrélation entre les résultats obtenus avec ce modèle et les simulations numériques.

Afin de confirmer ce constat, les Figure 3-17, Figure 3-18 et Figure 3-19 présentent respectivement, l'erreur maximale, l'erreur moyenne et l'écart type entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques. Il apparaît que l'écart maximal est très élevé dans le cas des modèles linéaires et purement quadratiques lesquels il varie entre 6.16 et 8.62 kWh/m<sup>2</sup>.an. À Errachidia cet écart atteint 15.34 kWh/m<sup>2</sup>.an à cause des fortes interactions entre les paramètres et les besoins de chauffage dû aux amplitudes élevées de la température extérieure.

L'erreur moyenne de ces modèles varie entre 1.1 et 4.36 kWh/m<sup>2</sup>.an. La dispersion de cette erreur est supérieure à celle des autres modèles avec un écart type variant entre 2.5 et 2.1 kWh/m<sup>2</sup>.an.

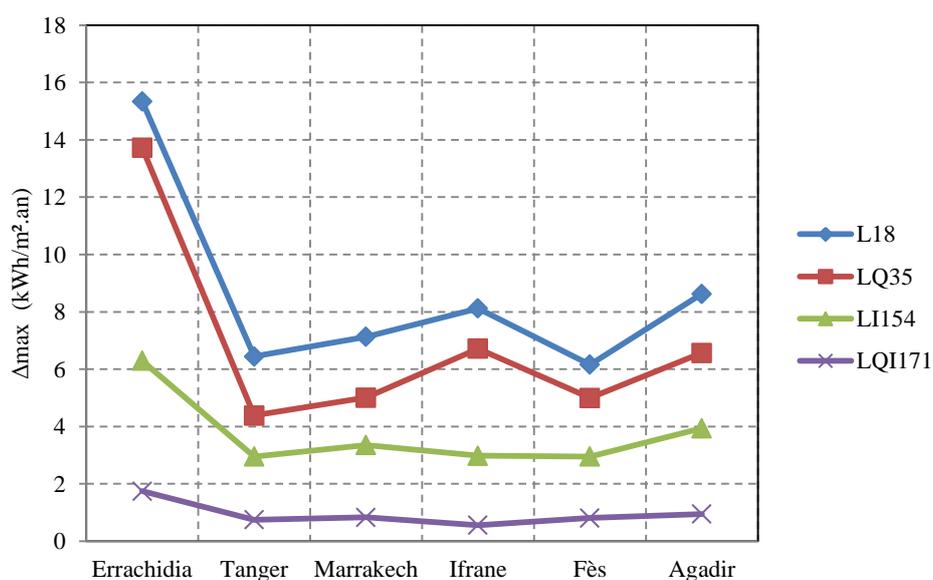


Figure 3-17 : Erreur maximale entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de chauffage

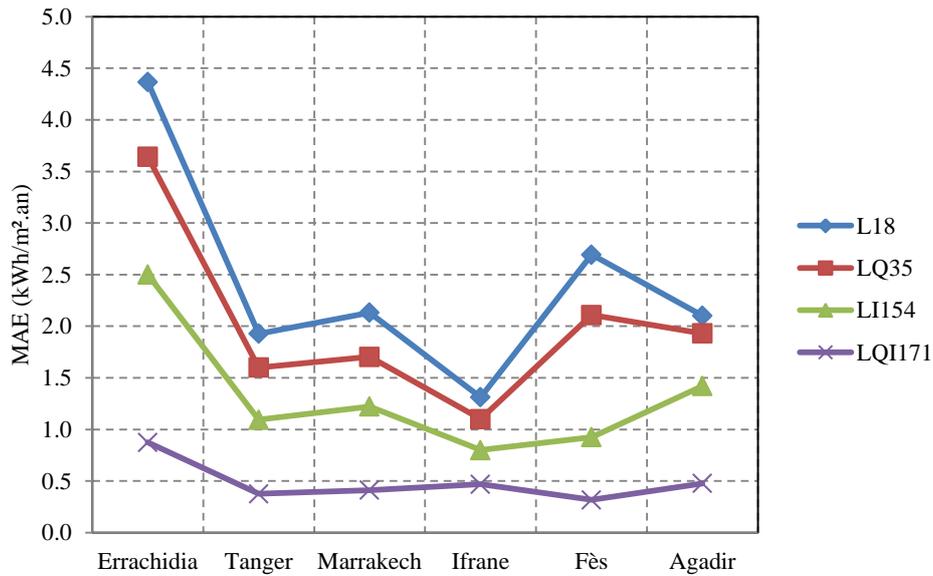


Figure 3-18 : Erreur moyenne entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de chauffage

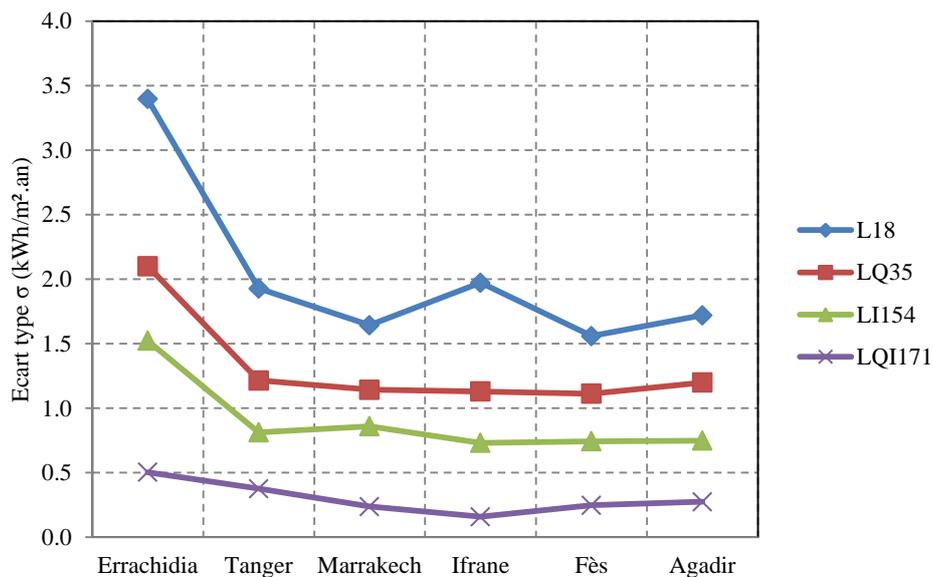


Figure 3-19 : Ecart type standard entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de chauffage

L'introduction des interactions entre les paramètres permet de réduire significativement l'erreur maximale et l'erreur moyenne ainsi que l'écart type. Elle permet aussi de corriger les fausses estimations des paramètres quadratiques. Le modèle quadratique complet fournit ainsi des résultats très satisfaisants. L'erreur maximale ne dépasse pas 1.7 kWh/m<sup>2</sup>.an pour toutes les zones climatiques. Nous constatons aussi une faible valeur de l'écart type ce qui signifie que les erreurs de ce modèle sont regroupées autour de la moyenne qui varie entre 0.87 kWh/m<sup>2</sup>.an à Errachidia et 0.15 kWh/m<sup>2</sup>.an à Ifrane.

### 3.6.2 Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de refroidissement

Par analogie au développement des modèles de prédiction des besoins de chauffage, nous suivons la même méthodologie pour le développement des modèles de prédiction des besoins de refroidissement. Les Figure 3-20, Figure 3-21, Figure 3-22, Figure 3-23, Figure 3-24 et Figure 3-25 montrent les résultats de comparaison entre les modèles polynomiaux et 100 simulations numériques supplémentaires. La saison de refroidissement est prise entre le 15 mai et le 15 Septembre.

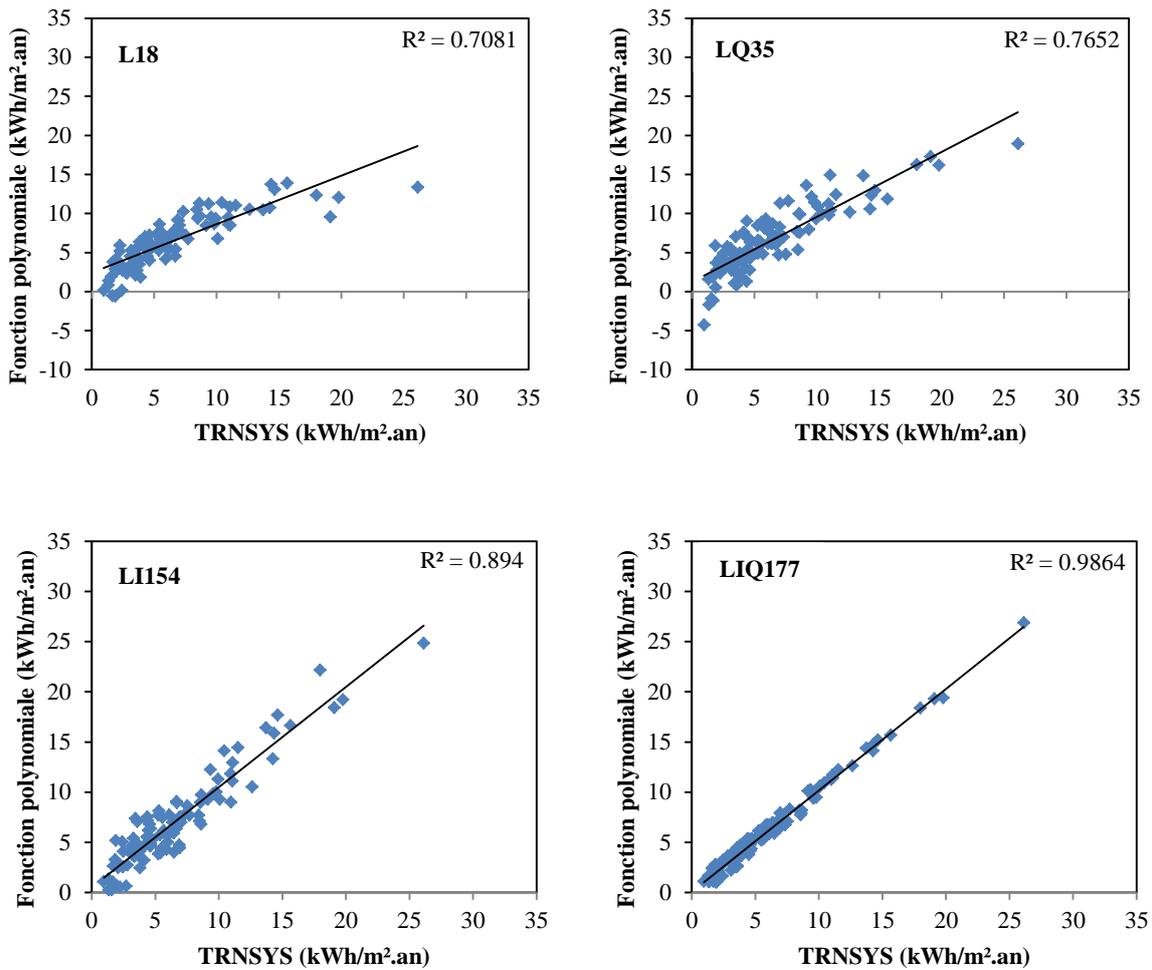


Figure 3-20 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Agadir

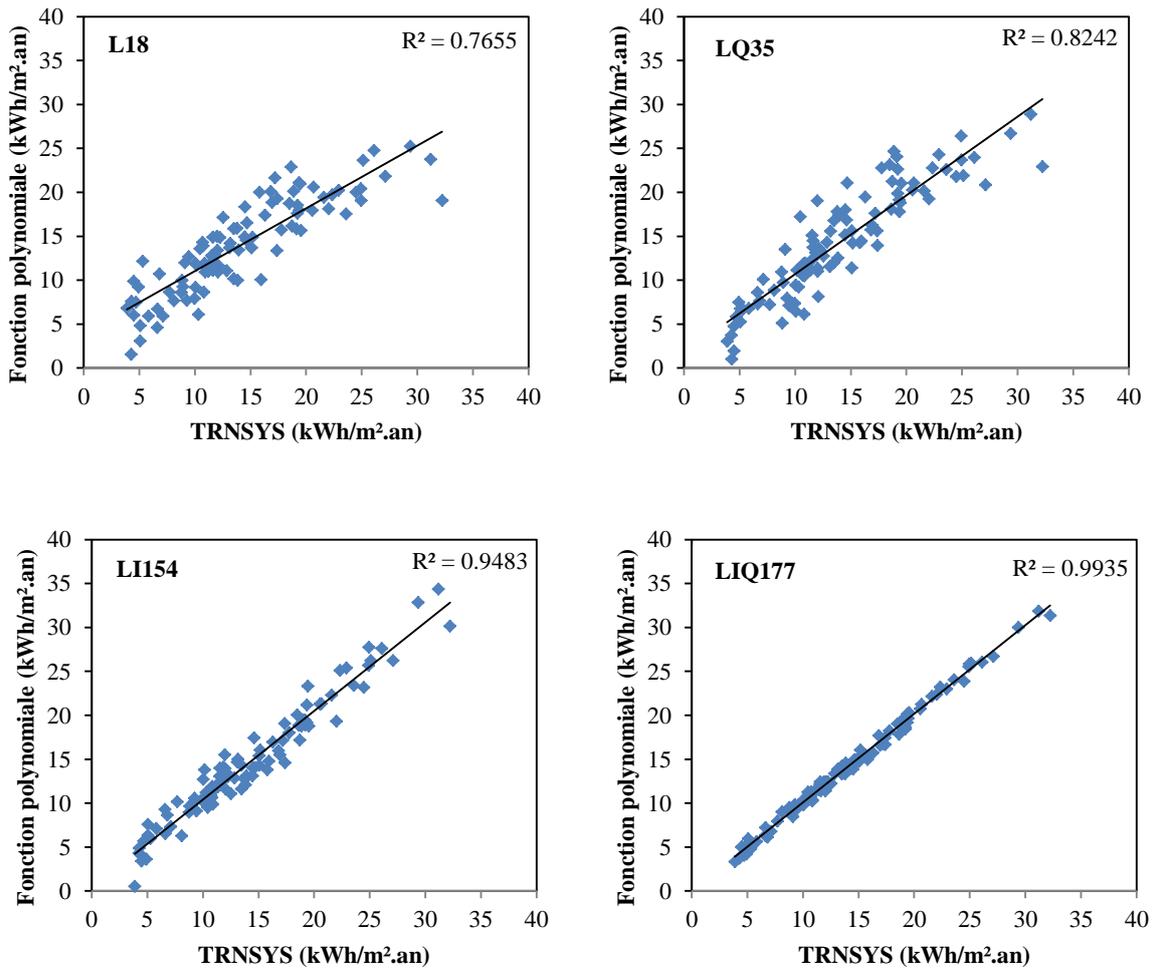
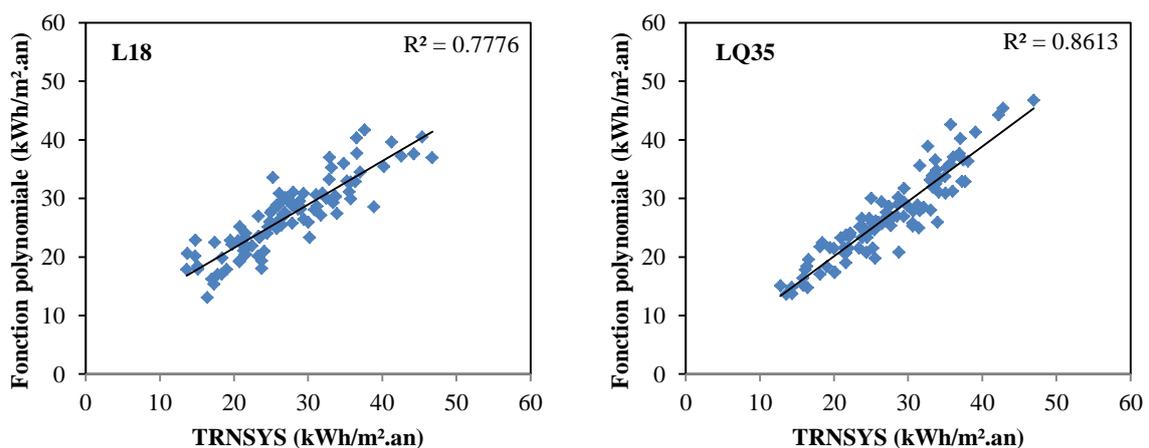


Figure 3-21 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Tanger



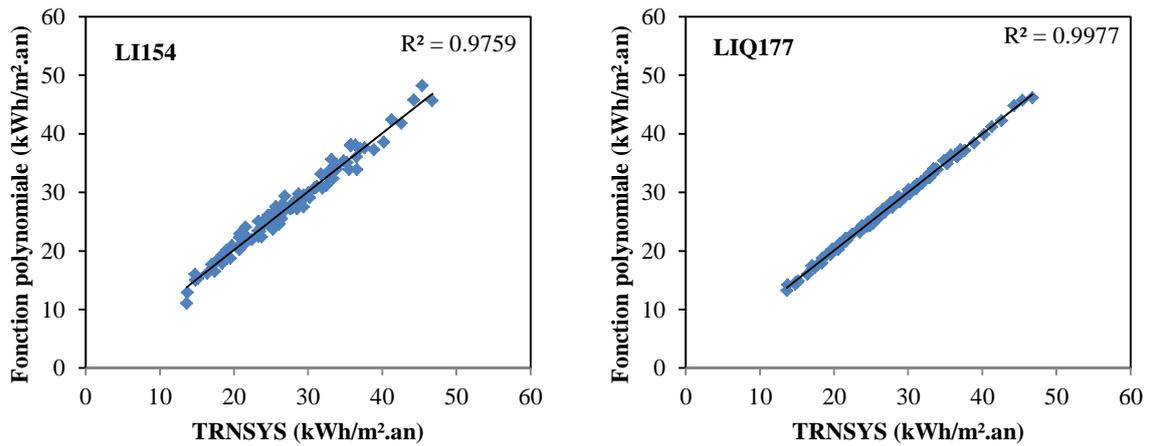


Figure 3-22 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Fès

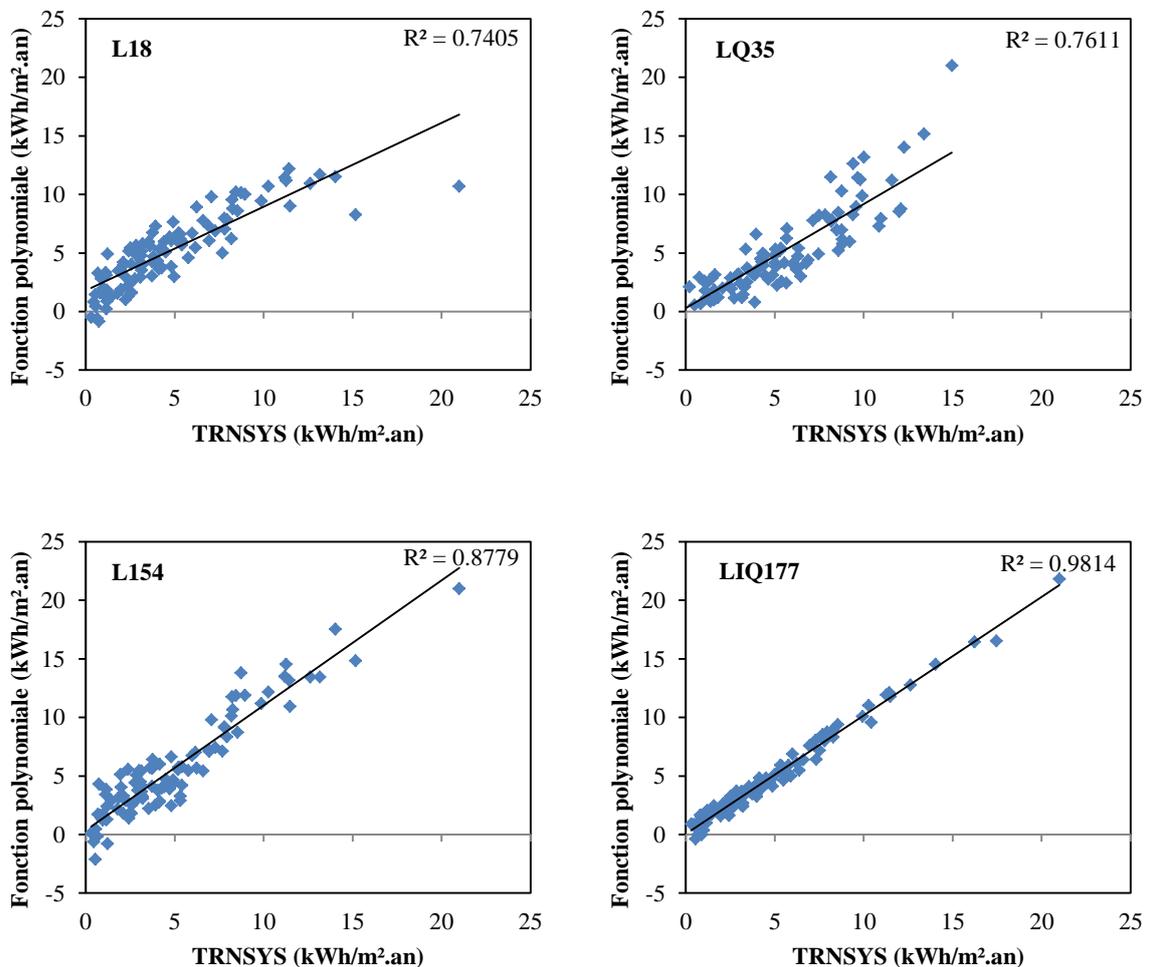


Figure 3-23 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Ifrane

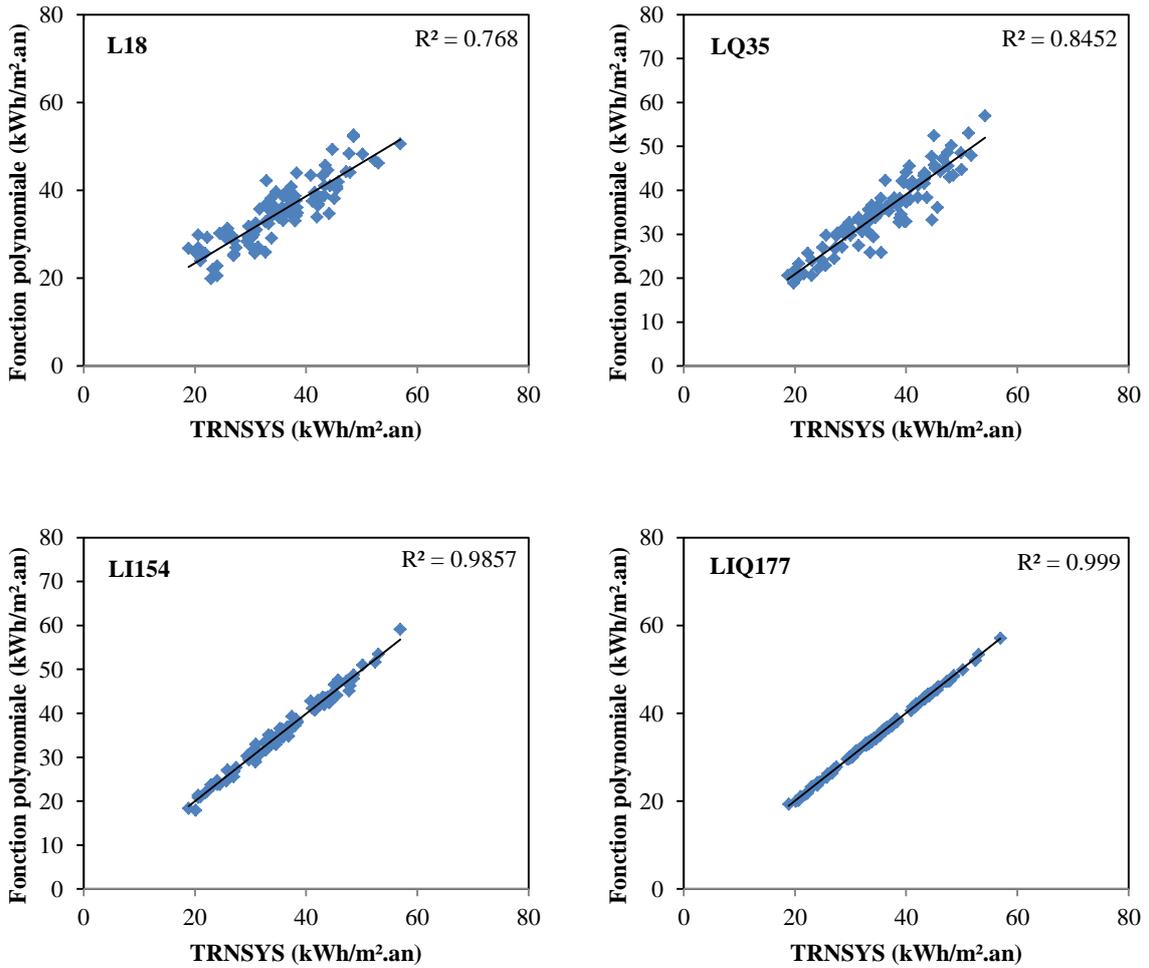
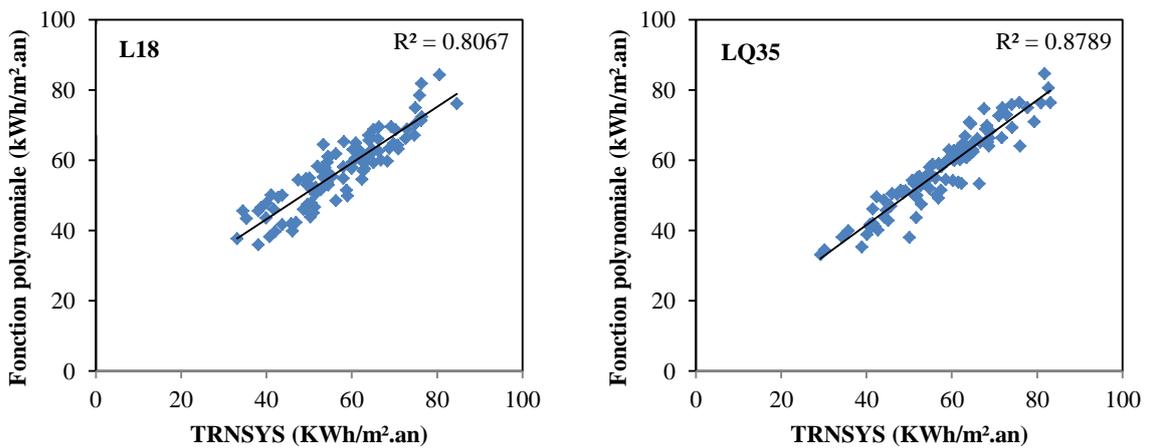


Figure 3-24 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Marrakech



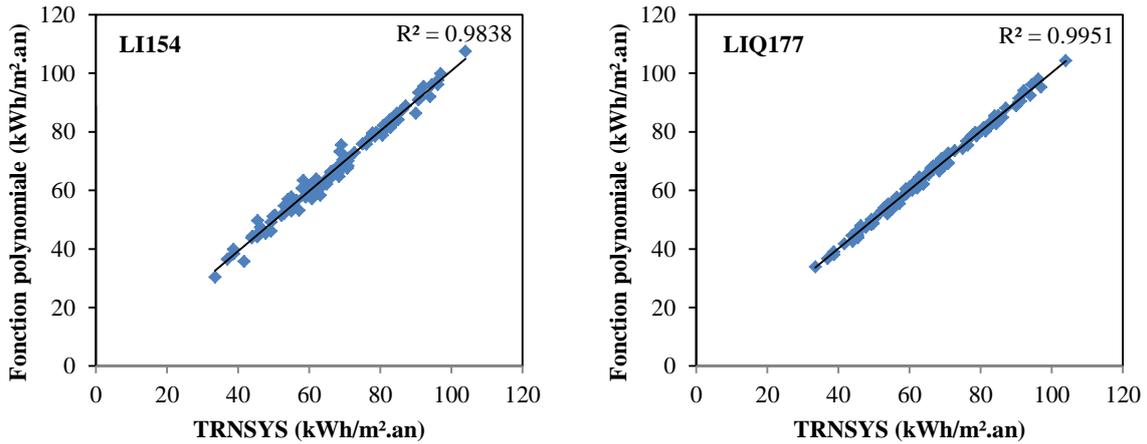


Figure 3-25 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Errachidia

Comme pour les besoins de chauffage, nous pouvons confirmer que pour les besoins de rafraîchissement, la meilleure précision est obtenue dans le cas du modèle quadratique complet. L'erreur maximale ne dépasse pas 2 kWh/m<sup>2</sup>.an pour toutes les zones climatiques. L'écart type dans ce cas ne dépasse pas 1 et donc les erreurs de ce modèle sont regroupées autour de la moyenne qui varie entre 0.12 kWh/m<sup>2</sup>.an à Marrakech et 0.52 kWh/m<sup>2</sup>.an à Errachidia (Figure 3-26, Figure 3-27 et Figure 3-28).

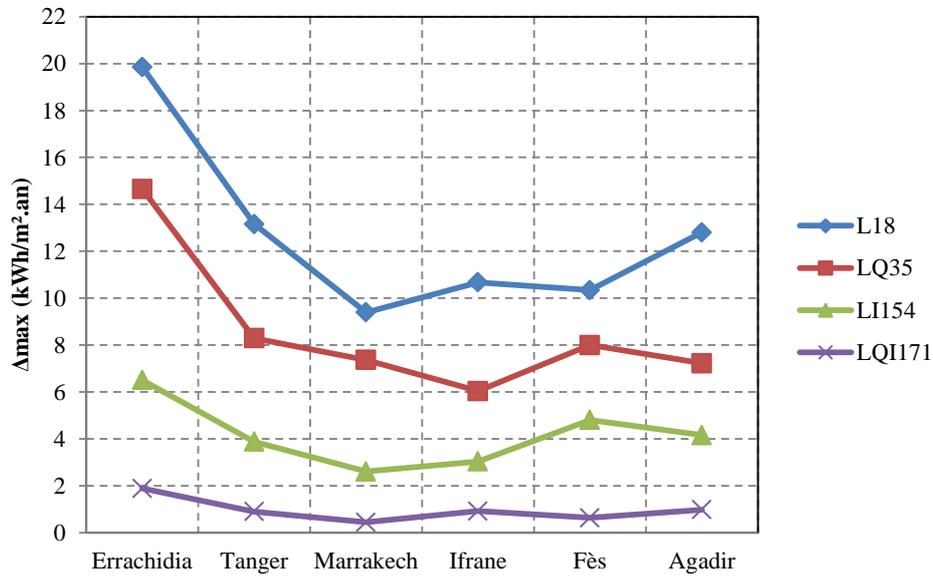


Figure 3-26 : Erreur maximale entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de refroidissement

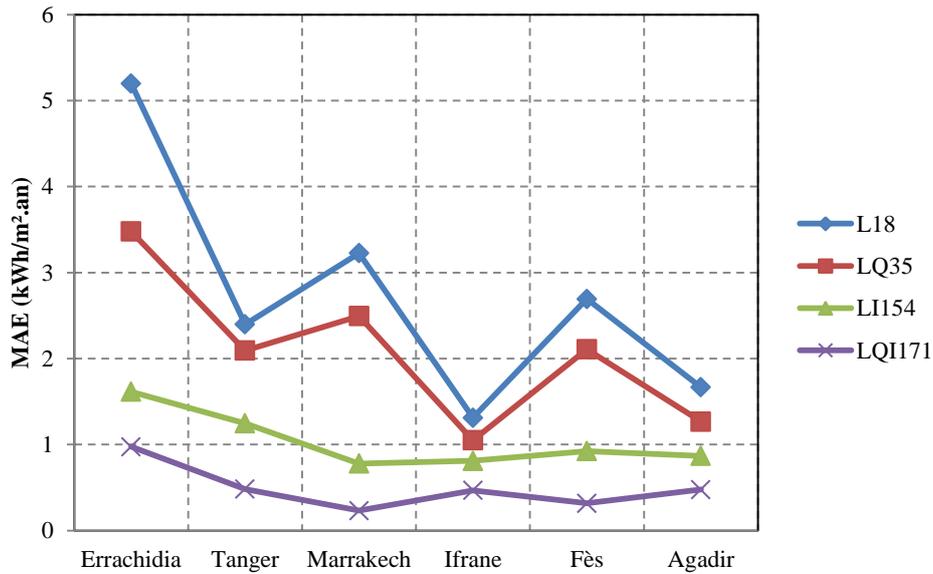


Figure 3-27 : Erreur moyenne entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de refroidissement

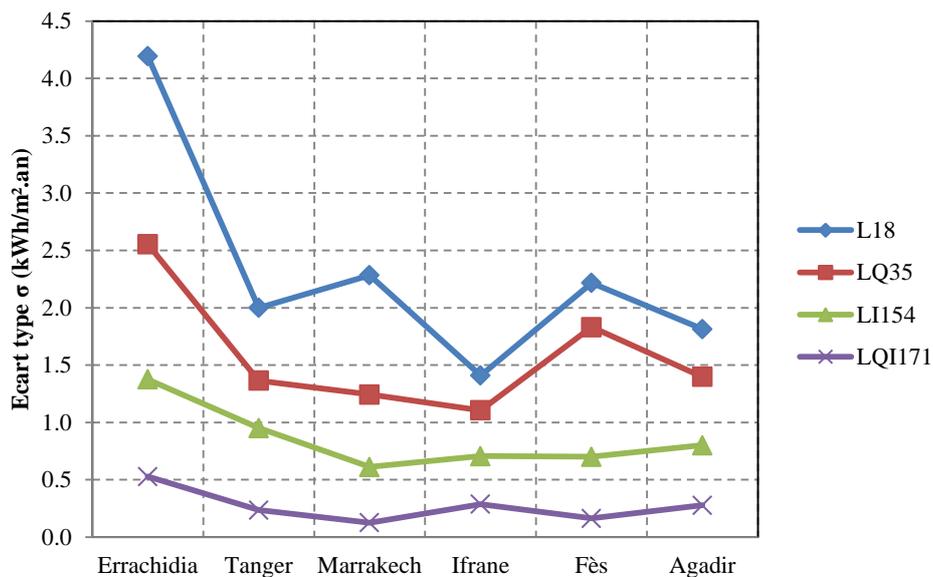


Figure 3-28 : Ecart type standard entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de refroidissement

### 3.6.3 Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins d'énergie finale

A l'instar des besoins de chauffage et de rafraîchissement, nous présentons dans les Figure 3-29, Figure 3-30, Figure 3-31, Figure 3-32, Figure 3-33 et Figure 3-34 une comparaison entre la consommation d'énergie finale annuelle de conditionnement obtenue par les modèles polynomiaux et celle obtenue par les simulations numériques.

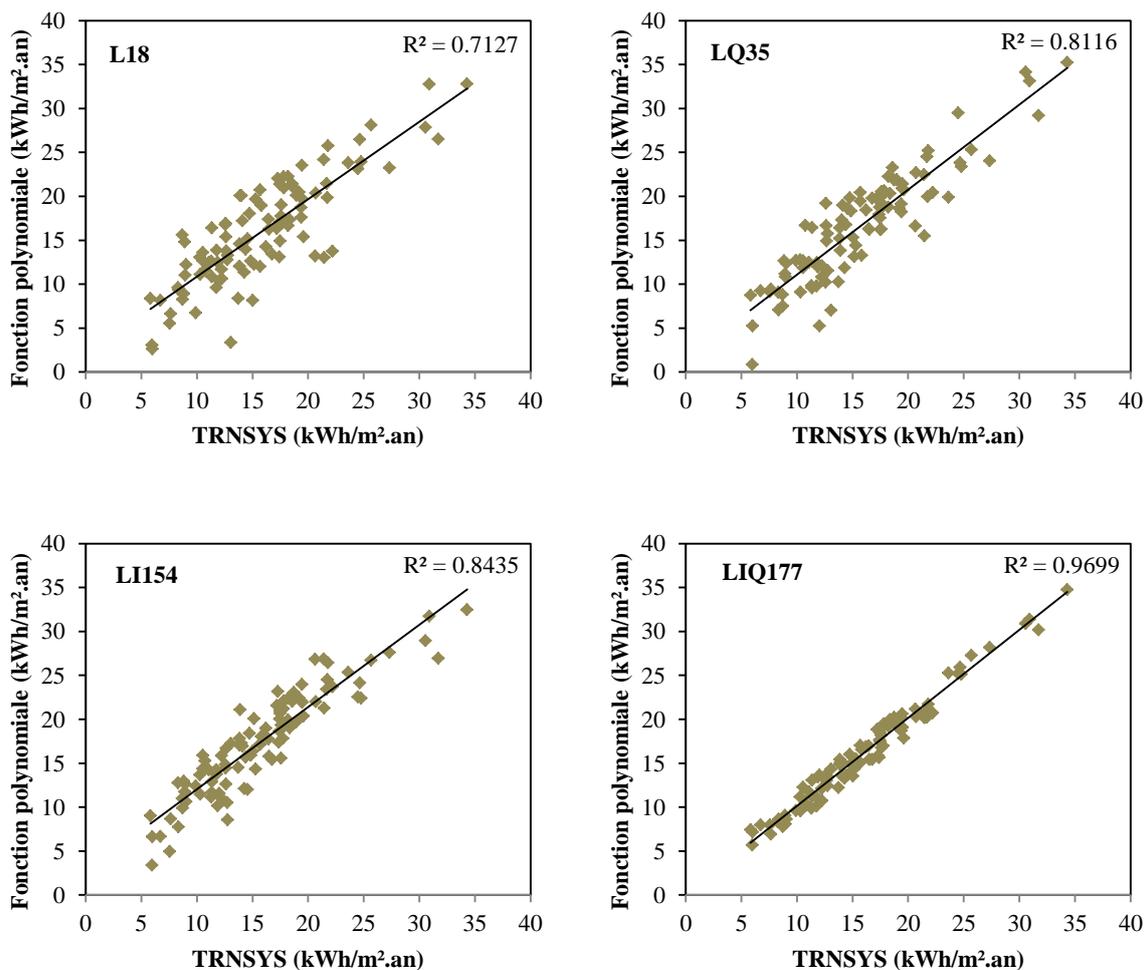
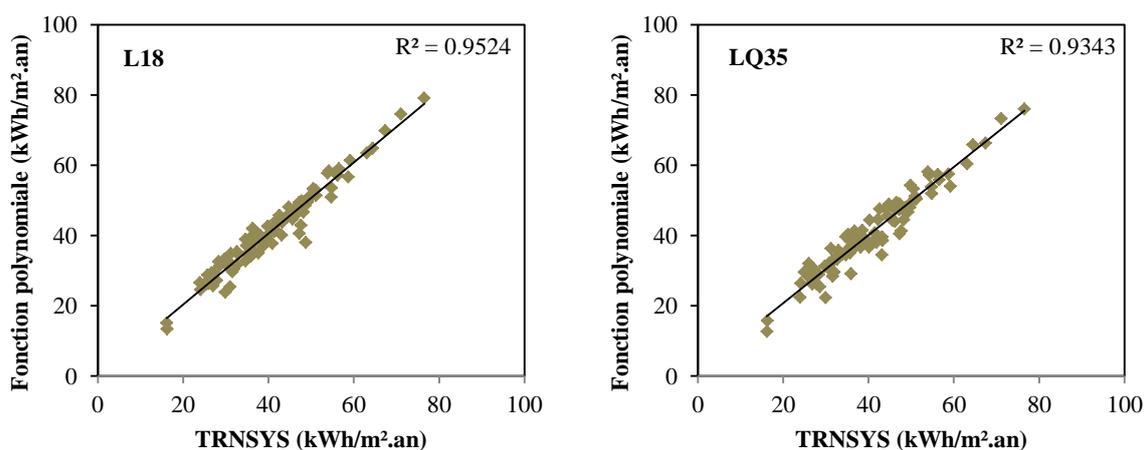


Figure 3-29 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Agadir



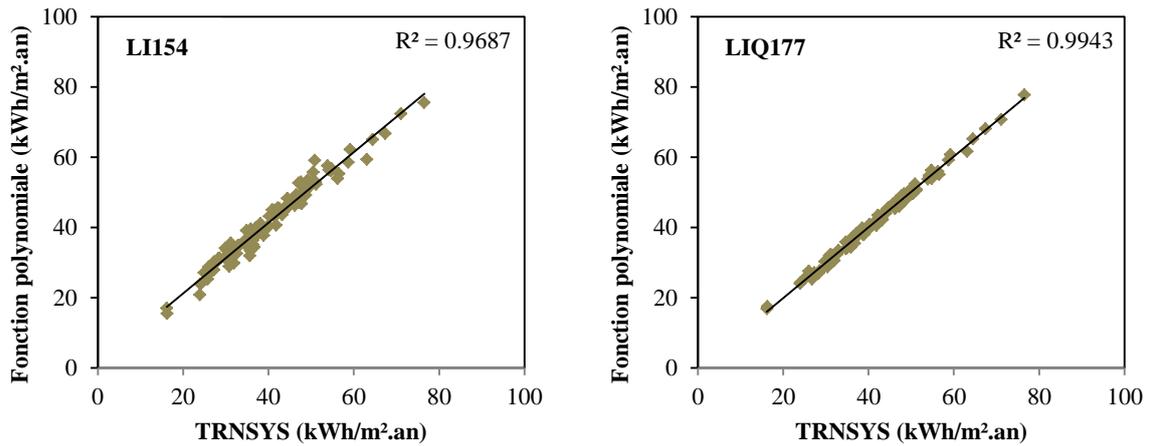


Figure 3-30 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Tanger

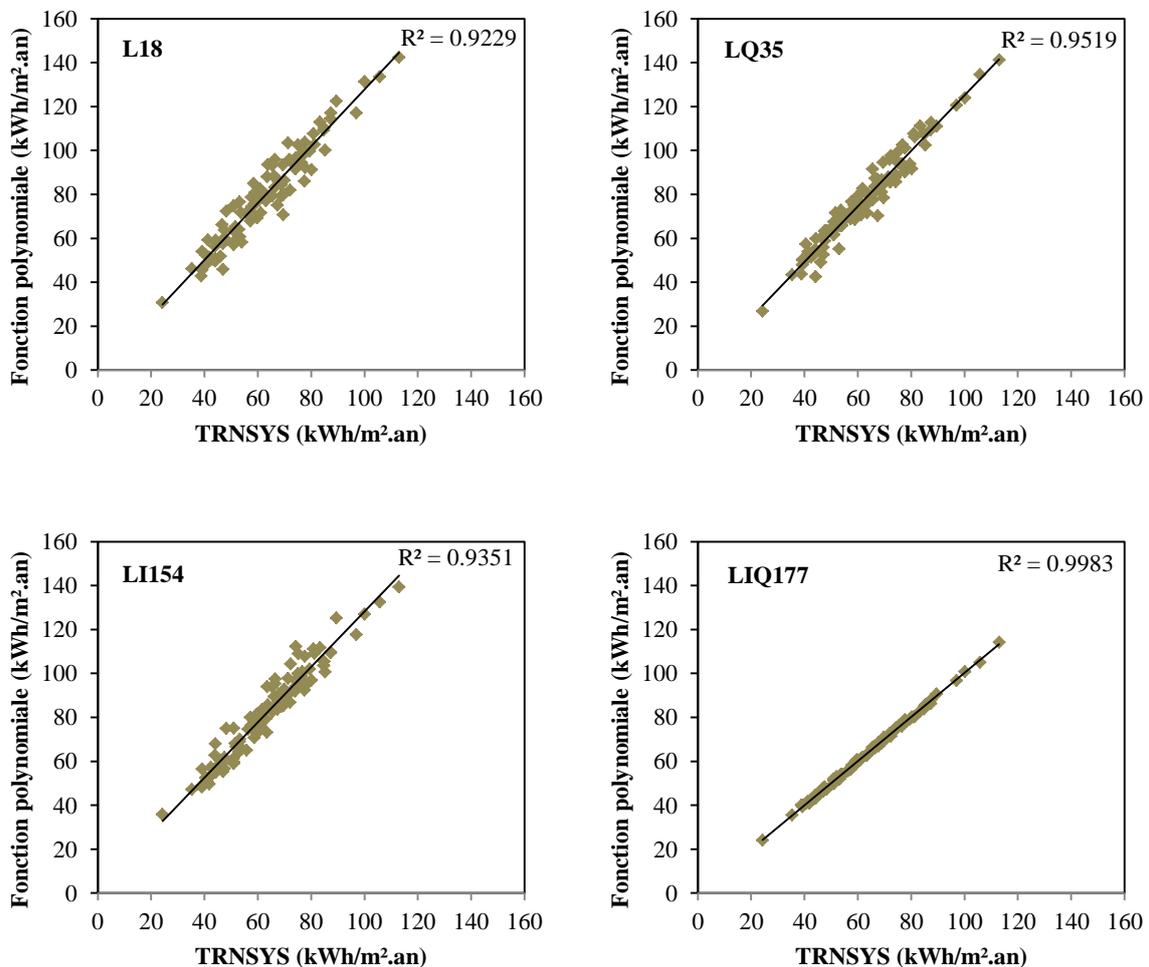


Figure 3-31 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Fès

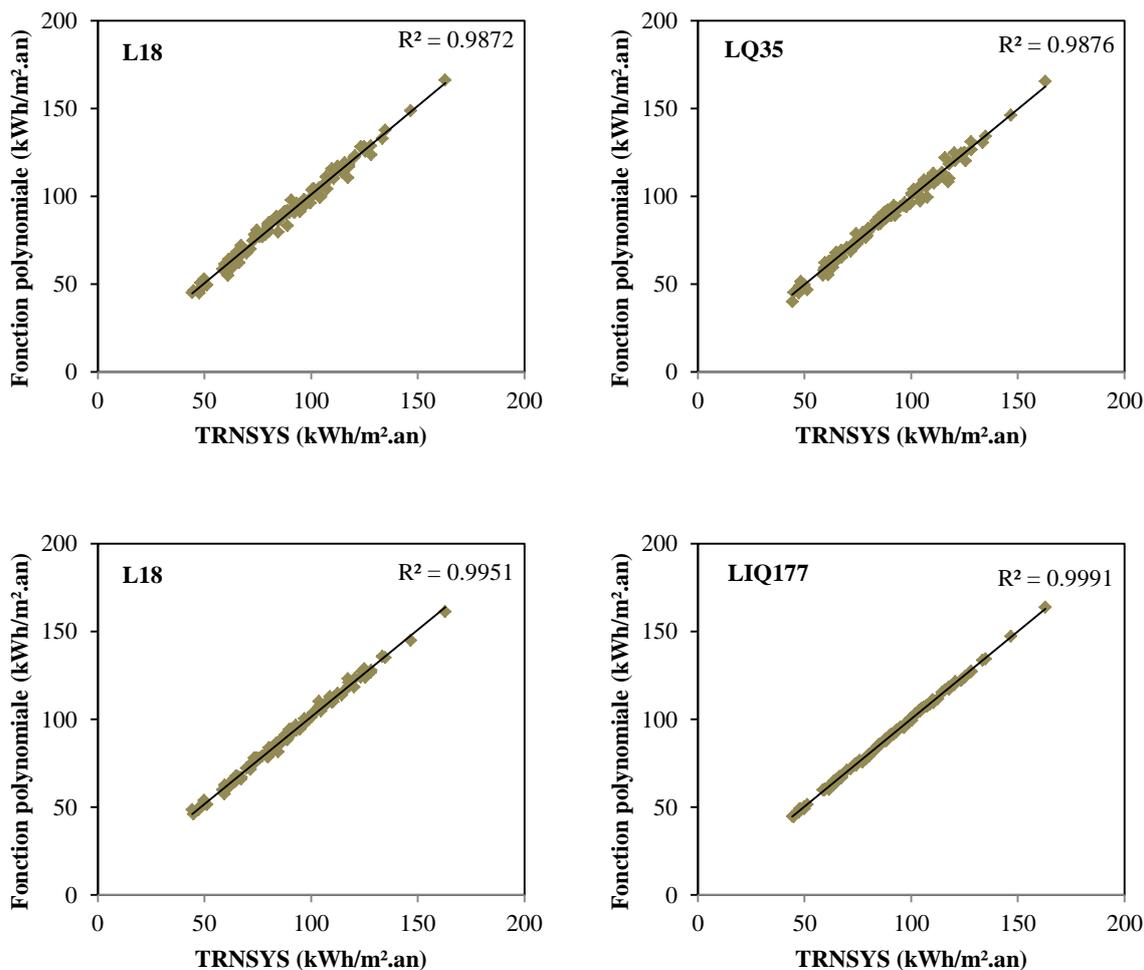
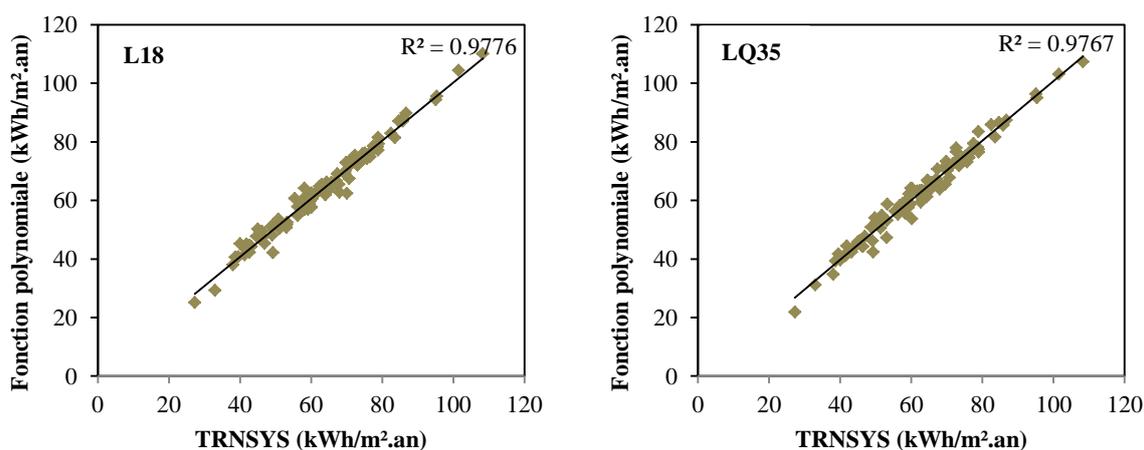


Figure 3-32 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Ifrane



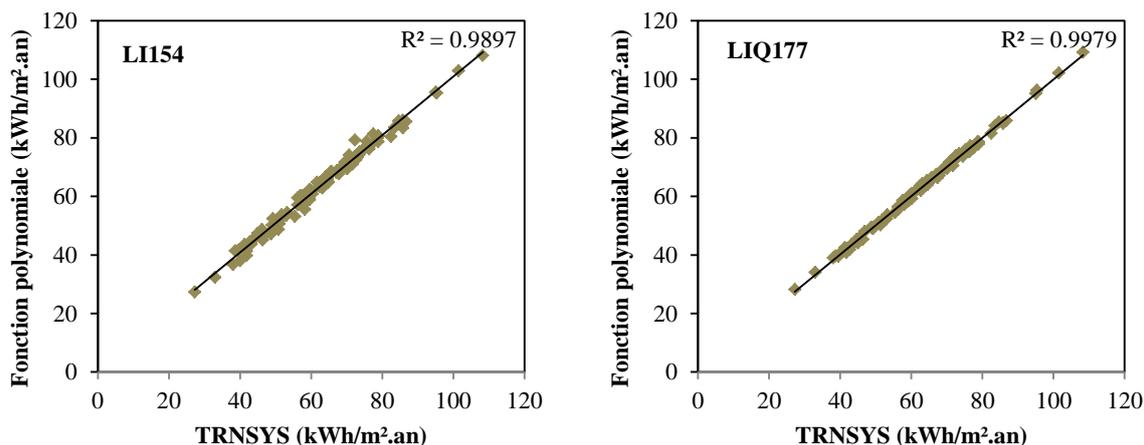


Figure 3-33 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Marrakech

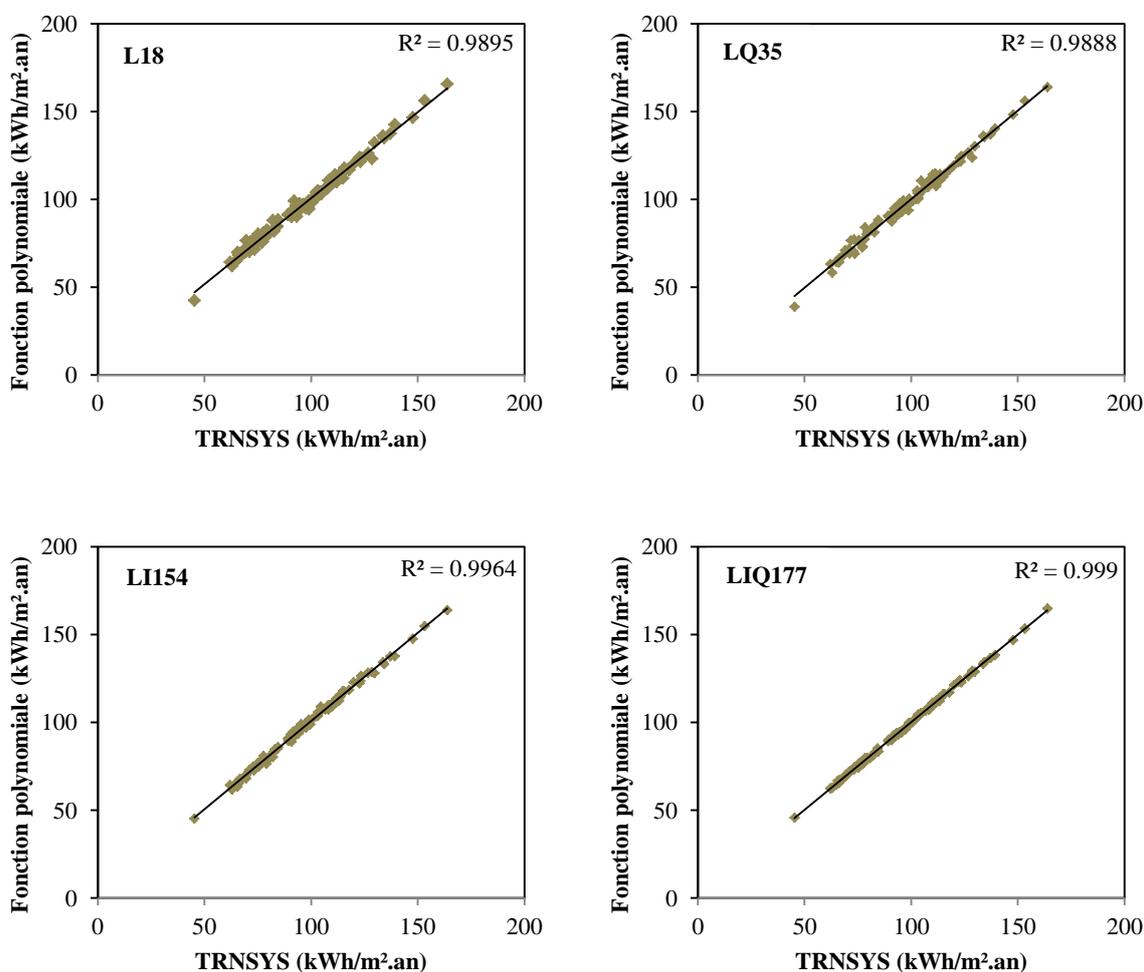


Figure 3-34 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins d'énergie finale à Errachidia

Comme pour les modèles de prédiction de chauffage et de refroidissement, le modèle quadratique complet est le plus précis (Figure 3-35, Figure 3-36 et Figure 3-37) pour prédire les besoins complets de conditionnement. Dans ce cas, l'erreur moyenne est un peu plus élevée que pour les modèles de prédiction de chauffage et de refroidissement. L'erreur maximale ne dépasse pas 2 kWh/m<sup>2</sup>.an à l'exception d'Errachidia. Dans cette ville, l'erreur maximale atteint 3.2 kWh/m<sup>2</sup>.an.

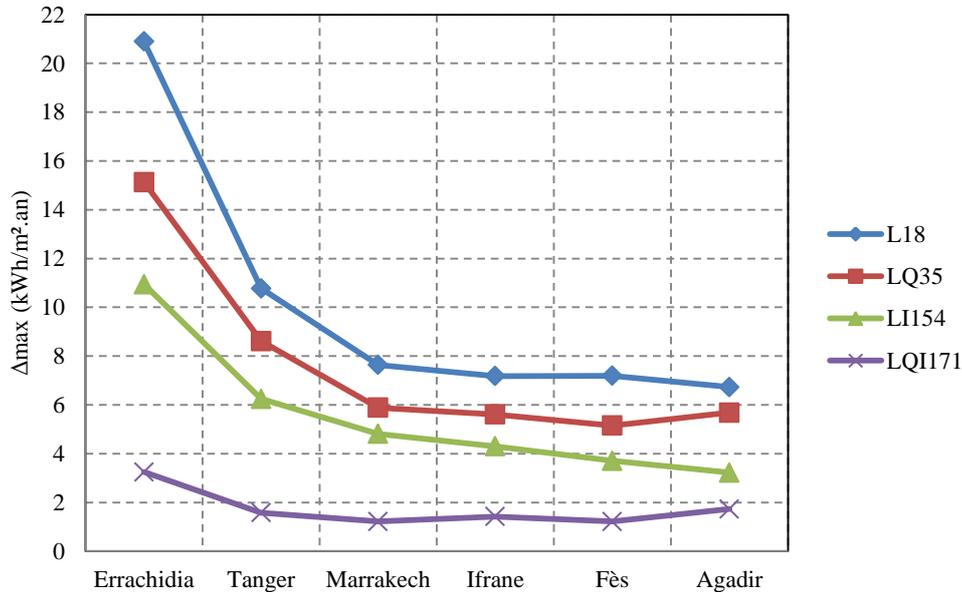


Figure 3-35 : Erreur maximale entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins d'énergie finale

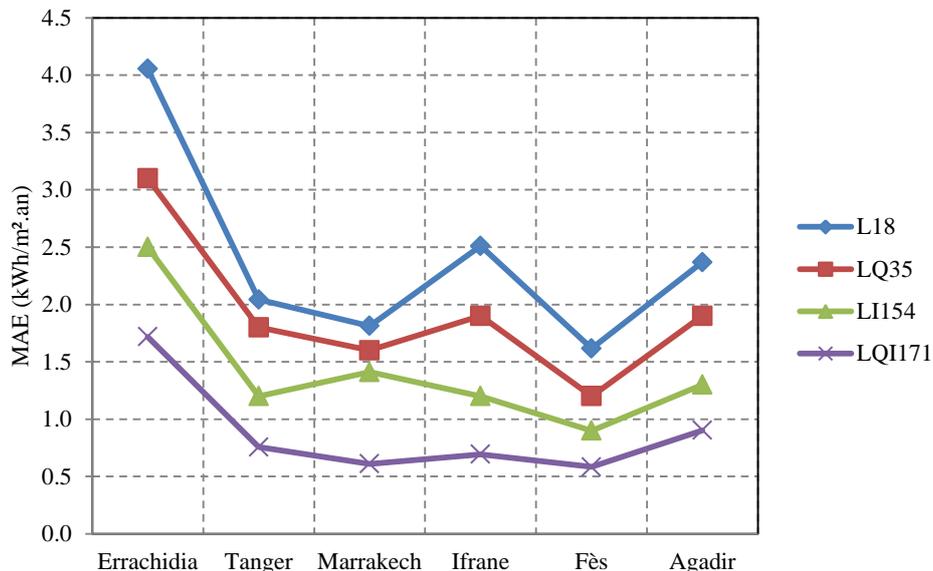


Figure 3-36 : Erreur moyenne entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins d'énergie finale

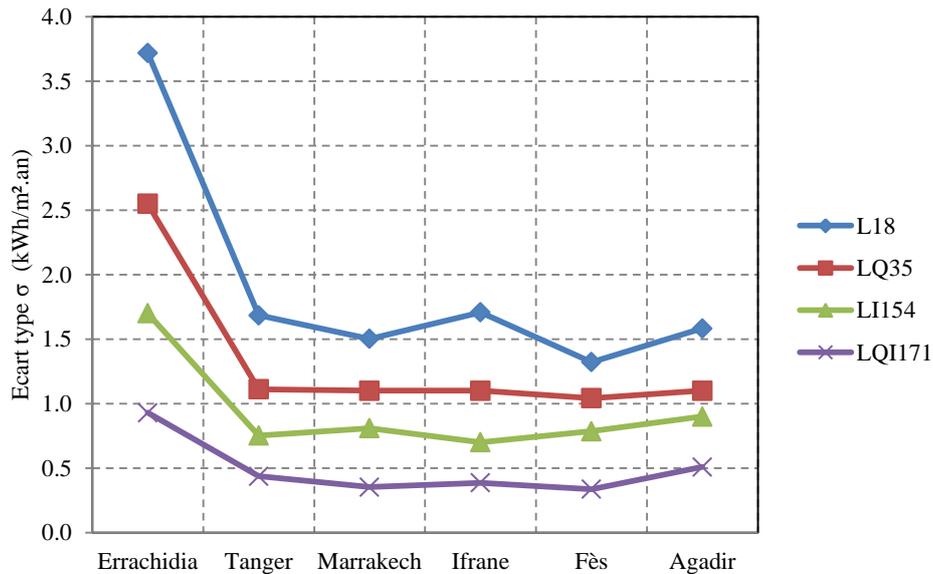


Figure 3-37 : Ecart type standard entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins d'énergie finale

L'erreur maximale dans ce cas varie entre 3.21 kWh/m².an à Fès et 4.38 kWh/m².an à Agadir. L'écart type varie entre 1.37 kWh/m².an à Agadir et 0.9 kWh/m².an à Fès. En effet, la dispersion de l'erreur absolue se situe aux alentours de l'erreur moyenne qui varie entre 1.62 kWh/m².an à Fès et 1.8 kWh/m².an à Tanger.

On peut donc conclure que le modèle quadratique complet permet une prédiction satisfaisante des besoins d'énergie finale de conditionnement. Il peut donc être utilisé pour l'analyse de sensibilité et l'optimisation multicritère.

### 3.6.4 Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction du confort thermique d'été

Afin d'évaluer le confort thermique d'été, deux critères ont été définis, à savoir le taux d'inconfort et les degrés heures d'inconfort. Comme nous l'avons démontré précédemment, en été de fortes interactions entre les paramètres sont présentes. De ce fait, nous n'utilisons que le modèle quadratique complet pour le développement des modèles polynomiaux (Figure 3-38).

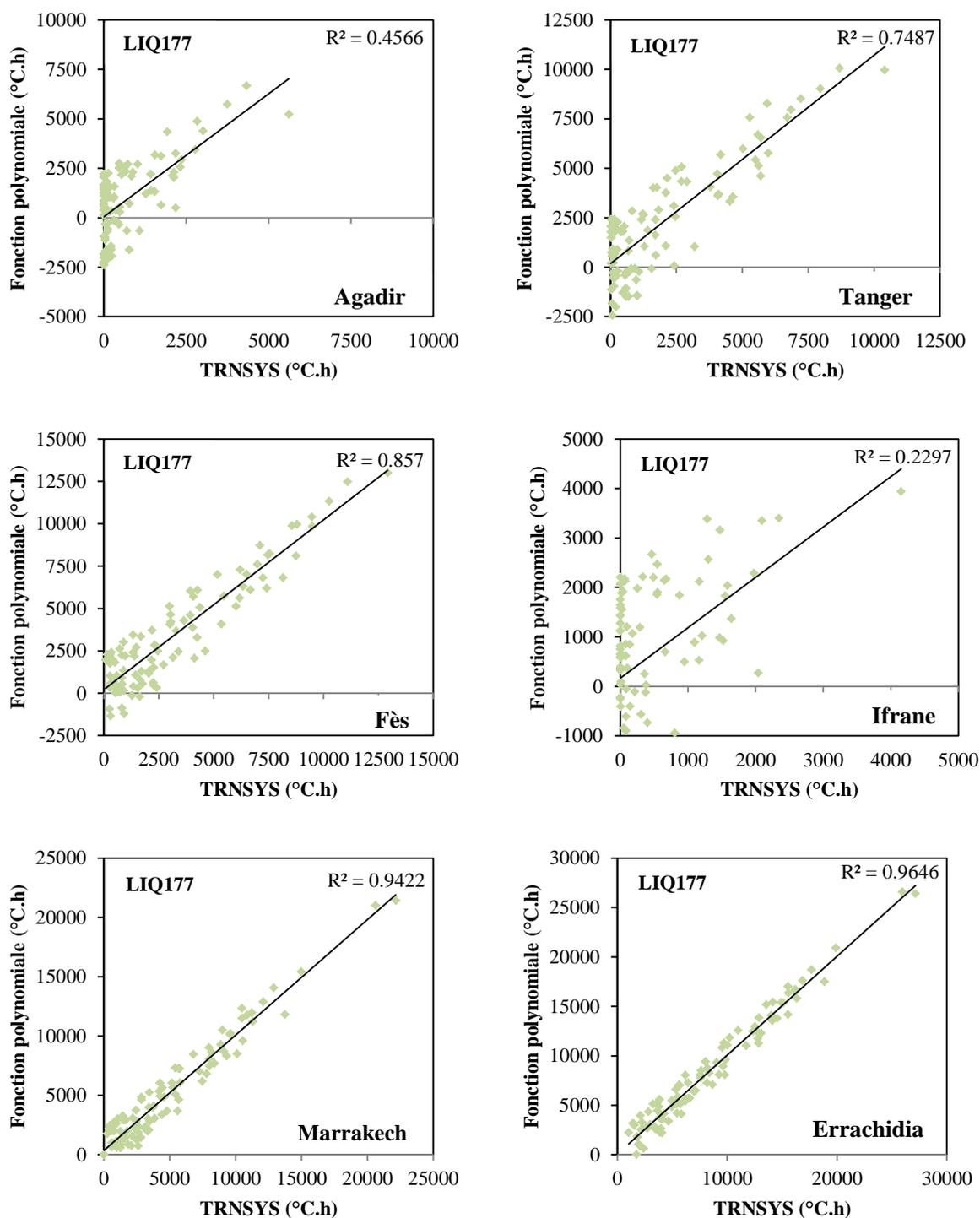


Figure 3-38 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des degrés heures d'inconfort d'été aux six zones climatiques au Maroc

Nous constatons que les modèles de prédiction des degrés heures d'inconfort ne sont pas fiables surtout pour Agadir, Tanger, Ifrane et Fès. Ceci prouve qu'un polynôme d'ordre supérieur à deux doit être utilisé. L'écart maximal et l'erreur moyenne sont aux alentours de 2000 °C.h et 1000 °C.h.

La Figure 3-39 montre la comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction du taux d'inconfort d'été dans les six zones climatiques.

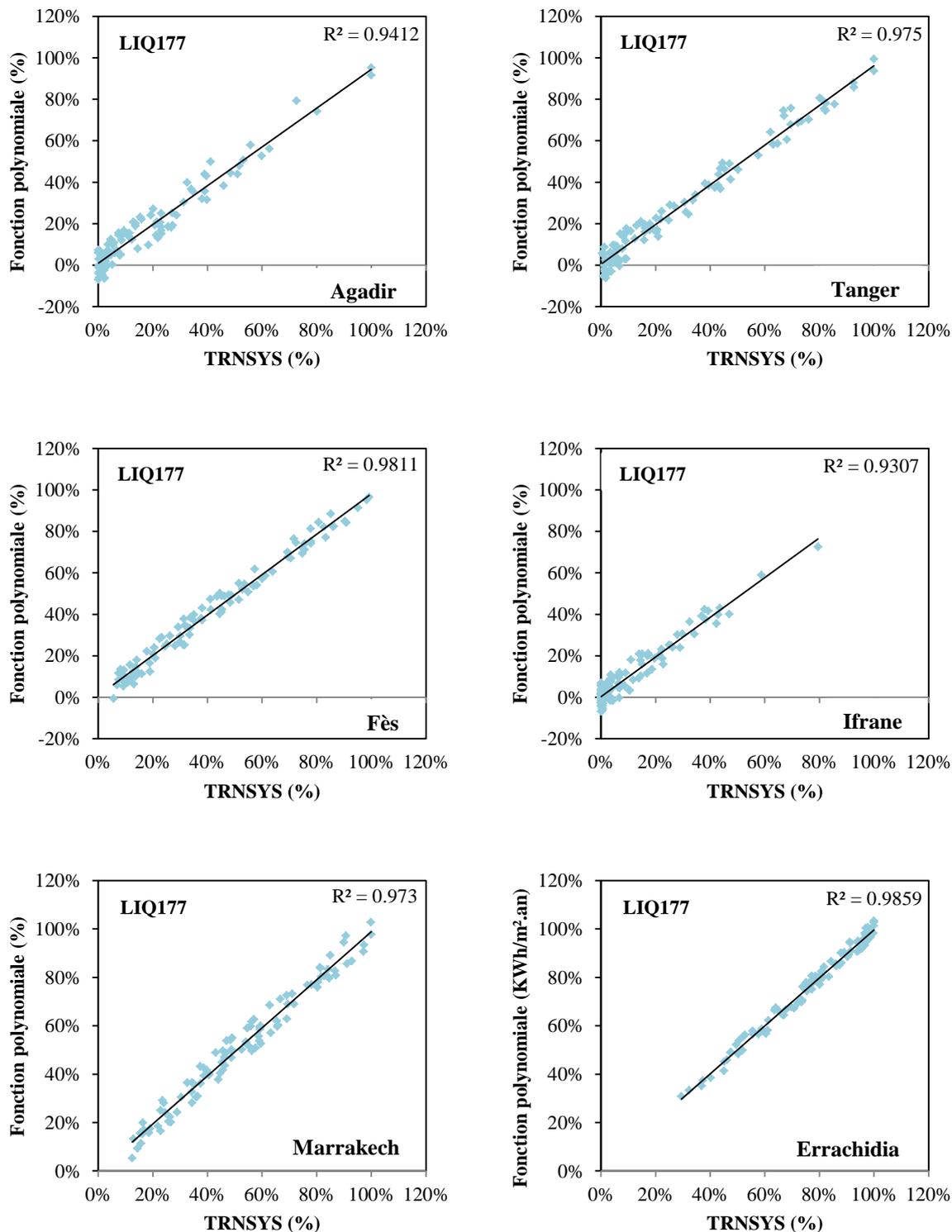


Figure 3-39 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction du taux d'inconfort d'été dans les six zones climatiques

Tableau 3-5. Erreur maximale, erreur moyenne et écart type des modèles de prédiction du taux d'inconfort d'été.

	<b>Agadir</b>	<b>Tanger</b>	<b>Fès</b>	<b>Ifrane</b>	<b>Marrakech</b>	<b>Errachidia</b>
$\Delta$ max	8.91%	8.44%	6.57%	7.29%	7.11%	3.62%
MAE	4.62%	3.97%	3.21%	3.39%	3.44%	1.93%
$\sigma$	2.56%	2.38%	1.78%	2.13%	2.13%	1.05%

L'estimation du taux d'inconfort est plus fiable. Le coefficient de régression dans tous les cas est supérieur à 0.9. L'écart maximal et l'écart moyen sont aux alentours de 6% et 3.5% respectivement dans la majorité des zones climatiques à l'exception d'Errachidia. Dans ce cas l'écart maximal et l'écart moyen sont plus faibles : 3.62% et 2% respectivement. L'écart type ne dépasse pas 2.5% dans la majorité des modèles polynomiaux (Tableau 3-5).

Même si la précision n'est pas très satisfaisante, elle reste acceptable pour prédire au moins la tendance de réduction de l'inconfort thermique d'été.

### 3.7 Analyse de sensibilité

#### 3.7.1 Analyse de sensibilité pour les besoins de chauffage

Une analyse de sensibilité peut être effectuée après avoir calculé les coefficients des modèles polynomiaux par la régression multilinéaire. Les valeurs des coefficients des modèles pour tous les plans d'expériences sont données en Annexe 3-1, 3-2, 3-3 et 3-4. Lorsque le signe de ces coefficients est positif, ceci indique qu'il y a une augmentation de la réponse quand le facteur passe du niveau bas au niveau haut et vice versa. À titre d'exemple, si on réduit le coefficient de transmission thermique des murs extérieurs (augmenter l'isolation), les besoins de chauffage diminuent.

La Figure 3-40 présente les effets des paramètres d'étude sur les besoins de chauffage. Les paramètres les plus influents sont le coefficient de transmission des murs extérieurs et de la toiture ainsi que les infiltrations d'air. Une perméabilité à l'air élevée augmente significativement les besoins de chauffage. De plus, les murs extérieurs et la toiture représentent une grande surface d'échange thermique et donc plus de déperdition surtout en hiver lorsque la température extérieure est beaucoup moins élevée que celle de l'intérieur.

Des facteurs solaires élevés des vitrages provoquent une augmentation des gains solaires et donc la réduction des besoins de chauffage. Les fenêtres sud ont l'effet double par rapport aux fenêtres Est et Ouest, car c'est la façade Sud qui reçoit le plus de rayonnement solaire en hiver. Les coefficients de transmission des vitrages et du cadre ont l'effet inverse et donc ils sont responsables de l'augmentation des besoins de chauffage.

Le rayonnement solaire est aussi responsable de la réduction des besoins de chauffage via l'absorption solaire des parois opaques en contact avec l'extérieur. En hiver une couleur sombre permet d'absorber plus de rayonnement solaire qu'une paroi de couleur claire. En se combinant avec la masse thermique des parois, la transmission de la chaleur absorbée est transmise progressivement afin d'assurer un minimum de chaleur la nuit lorsque le rayonnement solaire est nul et que la température extérieure est très basse. C'est pour cette

raison que les interactions entre le coefficient d'absorption des murs (et de la toiture) et le coefficient de transmission des murs (et de la toiture) sont très élevées par rapport aux autres interactions entre les différents paramètres. Afin de simplifier la présentation des résultats, nous avons décidé de ne pas montrer les effets les quadratique et les interactions entre les paramètres.

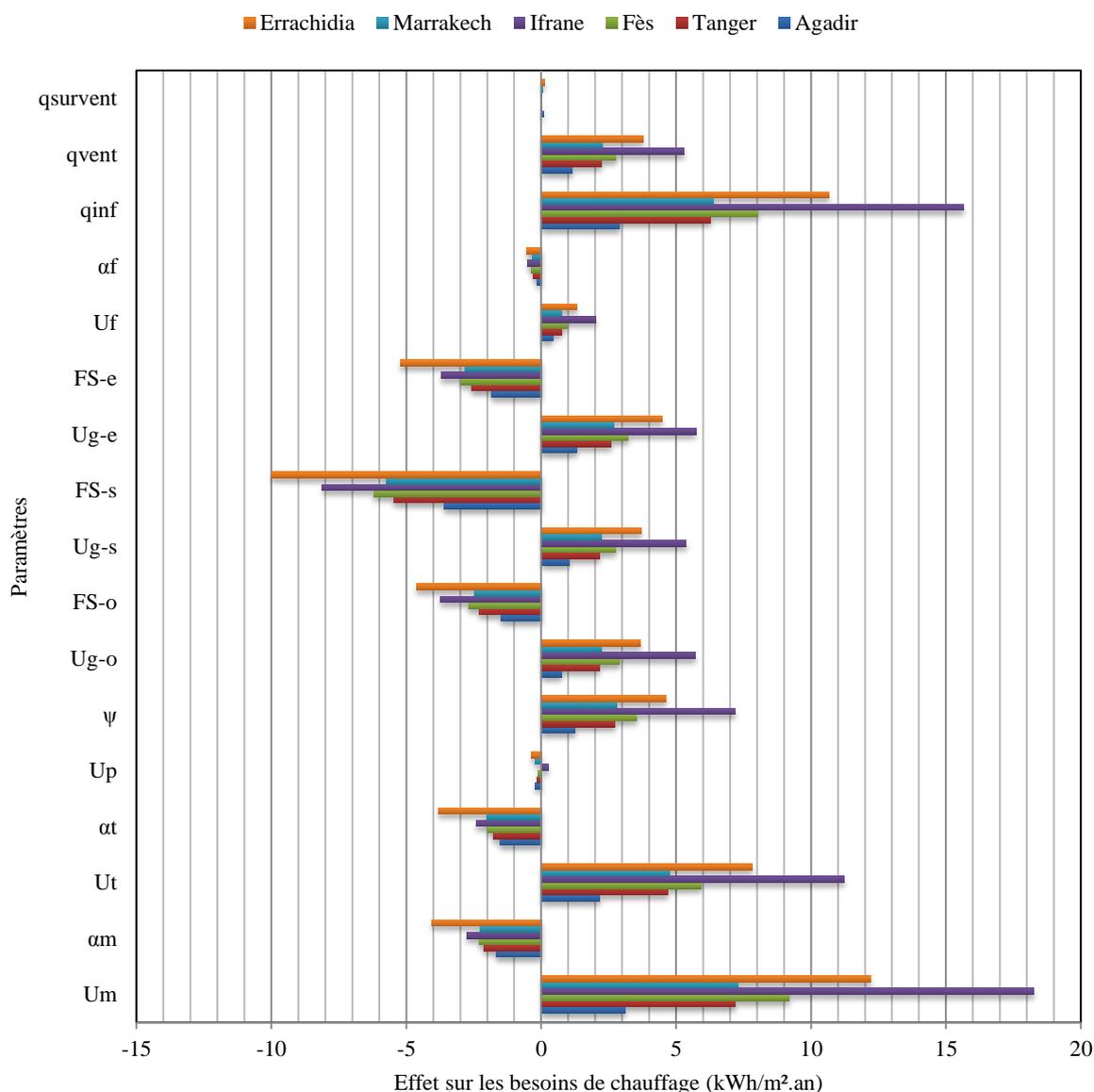


Figure 3-40 : Effet des paramètres sur les besoins de chauffage pour les six zones climatiques

Le renouvellement d'air par ventilation mécanique double flux avec un rendement de 0.9 permet aussi de réduire les besoins de chauffage par rapport à la ventilation simple flux.

Le coefficient de transmission du plancher bas, le coefficient d'absorption des cadres et la surventilation mécanique nocturne en été n'ont pas un impact significatif sur les besoins de chauffage. Il est à noter que l'isolation du plancher n'est pas nécessaire dans la majorité des villes. Le sol avec une température plus élevée que la température du plancher permet de limiter les déperditions thermiques dans le sol. À l'exception d'Ifrane, vu la température

extérieure très froide en hiver, la température du sol reste légèrement inférieure à celle de la température intérieure et de faibles déperditions thermiques à travers le plancher bas peuvent apparaître.

### **3.7.2 Analyse de sensibilité pour les besoins de refroidissement**

Généralement, les besoins de refroidissement sont principalement provoqués par les gains internes et les apports solaires. La Figure 3-41 montre les effets des paramètres sur les besoins de refroidissement. Les valeurs des coefficients des modèles pour tous les plans d'expériences sont données en Annexe 3-5, 3-6, 3-7 et 3-8. Nous constatons que les facteurs solaires des vitrages sont les plus influents. L'orientation Ouest est la plus critique, car dans ce cas le rayonnement solaire est plus intense en été par rapport aux autres orientations. Dans ce cas, un vitrage à contrôle solaire ou une protection solaire extérieure s'avère nécessaire surtout dans le cas d'Errachidia et Marrakech.

Toujours en relation avec le rayonnement solaire, les coefficients d'absorption élevés des murs et de la toiture augmentent aussi les besoins de refroidissement. La toiture reçoit un rayonnement plus intense et vertical en été par rapport aux murs. C'est pour cette raison que l'influence du coefficient d'absorption de la toiture est plus élevée. L'utilisation d'une peinture claire ou des matériaux de revêtement à faible absorption solaire est donc recommandée.

La surventilation nocturne joue aussi un rôle important en été. L'air extérieur généralement plus frais remplace l'air intérieur plus chaud à l'exception d'Errachidia. Dans cette ville, la température nocturne en été est supérieure à la température de consigne d'été (26°C). Dans ce cas, la surventilation nocturne n'est pas recommandée.

Dans le cas des villes très chaudes en été à savoir Marrakech, Fès et Errachidia, l'isolation des murs diminue les besoins de refroidissement. La température extérieure dépasse souvent la température intérieure qui est égale ou inférieure à la température de consigne. Le cas contraire est constaté dans la ville d'Agadir, Tanger et Ifrane. L'évacuation de la chaleur vers l'extérieur qui est plus frais surtout la nuit est bloquée par l'isolation thermique. Cette dernière engendre ce qu'on appelle l'effet thermos. Le même raisonnement peut être fait concernant le coefficient de transmission linéique des ponts thermiques.

Les infiltrations d'air sont responsables de l'augmentation des besoins de refroidissement, car pendant les jours chauds d'été surtout pour Fès, Marrakech et Errachidia, la température extérieure dépasse largement la température de consigne.

Une température du sol plus fraîche que celle de l'extérieur permet l'évacuation de la chaleur à travers le plancher en contact avec le sol. Ainsi, l'isolation du plancher n'est pas souhaitable, car elle augmente les besoins de refroidissement.

En plus des interactions éventuelles entre les parois opaques et les coefficients d'absorption solaires associés qui sont élevées, la valeur des autres interactions a aussi une influence non négligeable sur les besoins de refroidissement.

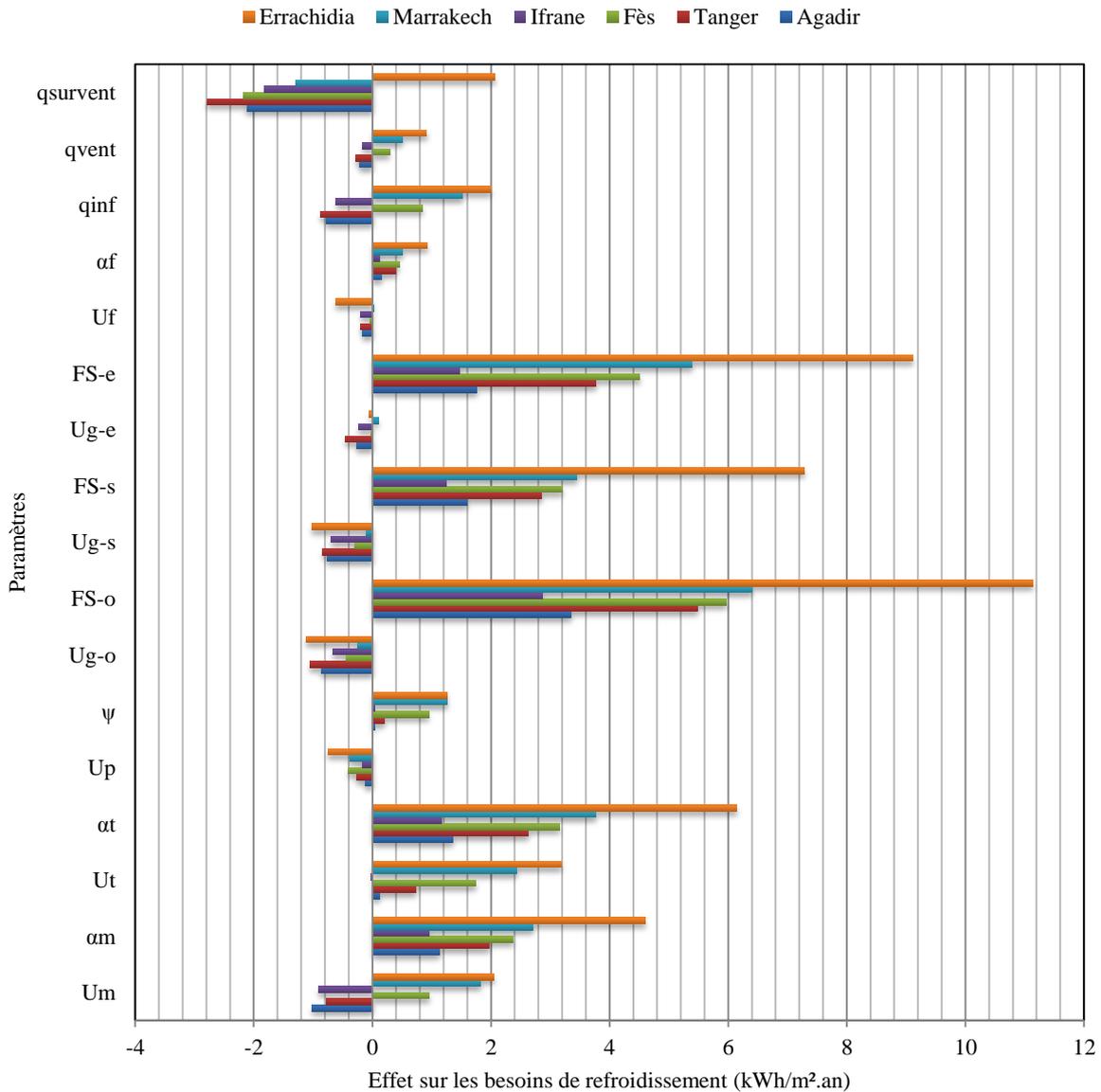


Figure 3-41 : Effets des paramètres sur les besoins de refroidissement pour les six zones climatiques

### 3.7.3 Analyse de sensibilité pour les besoins d'énergie finale

La Figure 3-42 montre les effets des paramètres de conception sur les besoins d'énergie finale pour les six zones climatiques. Les valeurs des coefficients des modèles pour tous les plans d'expériences sont données en Annexe 3-9, 3-10, 3-11 et 3-12. L'impact des paramètres de conception sur les besoins d'énergie finale représente en quelque sorte la sommation des effets de ces paramètres sur les besoins de chauffage et de refroidissement.

Nous pouvons constater que le coefficient de transmission des murs extérieurs et de la toiture ainsi que le taux d'infiltration d'air sont les paramètres les plus influents sur les besoins d'énergie finale. Les solutions techniques pour une conception énergétique efficace doivent être choisies avec beaucoup d'attention pour l'amélioration de ces paramètres. Le traitement des ponts thermiques permet aussi de réduire les besoins d'énergie finale d'une manière significative.

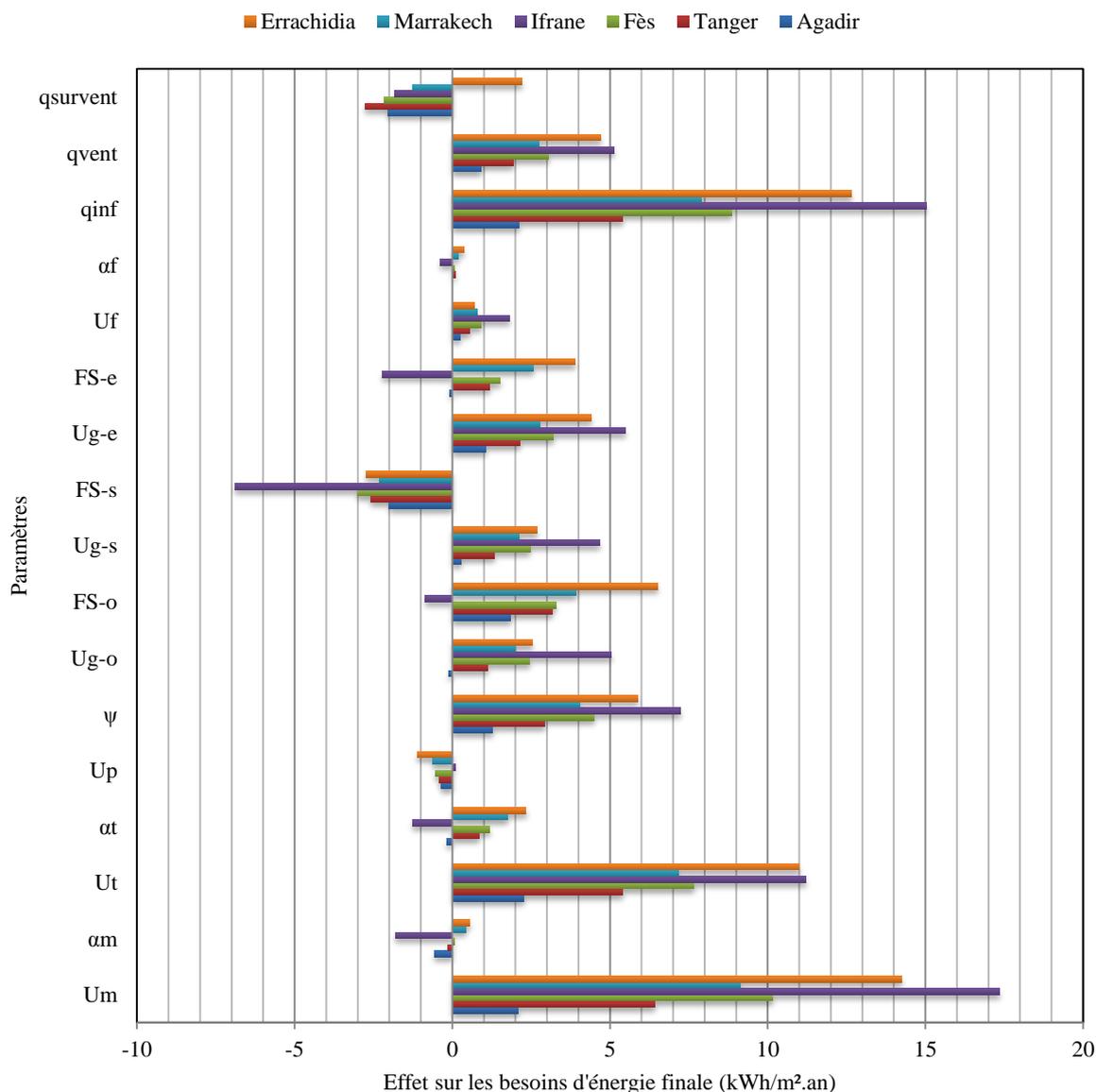


Figure 3-42 : Effets des paramètres sur les besoins d'énergie finale pour les six zones climatiques

Concernant le vitrage nous constatons qu'un facteur solaire élevé permet de réduire les besoins d'énergie finale à Ifrane sur toutes les façades. En revanche, pour les autres zones climatiques, ceci n'est valable que pour l'orientation sud pour la réduction des besoins de chauffage en hiver. Les facteurs solaires des façades Est et Ouest doivent être impérativement réduits, car il y a dominance des besoins de refroidissement.

Par ailleurs, des coefficients de transmission des vitrages et des cadres élevés ont toujours tendance à augmenter les besoins en énergie finale pour toutes les façades. En effet des vitrages performants doivent être utilisés.

Un coefficient d'absorption des murs extérieurs élevé ne permet de réduire les besoins d'énergie finale qu'à Ifrane. Dans les autres villes, ce paramètre est négligeable. Par contre, l'effet du coefficient d'absorption de la toiture est plus important dans les zones climatiques à

l'exception d'Agadir. À Ifrane une valeur élevée est souhaitable afin d'absorber le maximum de rayonnement solaire permettant de réduire les besoins de chauffage très dominants. Dans les autres zones climatiques, la réflexion du rayonnement solaire est nécessaire du fait de la dominance des besoins de refroidissement.

Comme prévu, nous confirmons une fois de plus que l'isolation thermique du plancher n'est pas nécessaire. Les limites réglementaires sur la résistance thermique du plancher définie par la RTCM ne sont pas justifiées dans notre cas d'étude. L'absorption des cadres à un effet très marginal sur les besoins d'énergie finale.

Une ventilation mécanique double flux et la surventilation mécanique nocturne s'avèrent donc nécessaires pour la réduction des besoins d'énergie finale. Sauf pour Errachidia où la même justification effectuée pour les besoins de refroidissement peut être retenue.

#### **3.7.4 Analyse de sensibilité pour le taux d'inconfort d'été**

Pour l'analyse de sensibilité sur le confort thermique d'été, nous présentons uniquement les effets des paramètres de conception sur le taux de confort thermique d'été (Figure 3-43). Les valeurs des coefficients des modèles pour tous les plans d'expériences sont données en Annexe 3-13, 3-14, 3-15 et 3-16. Le même raisonnement effectué pour l'analyse de sensibilité sur les besoins de refroidissement peut être effectué pour le taux d'inconfort d'été avec quelque exception :

- L'isolation des murs, de la toiture ainsi que le traitement thermique ne sont pas nécessaires ;
- La surventilation nocturne permet de réduire significativement le taux d'inconfort thermique d'été pour toutes les zones climatiques ;
- La ventilation double flux doit être arrêtée ou il est nécessaire d'utiliser un by-pass en été pour passer à la ventilation simple flux ;
- Un taux d'infiltration d'air élevé permet le renouvellement d'air et l'évacuation de la chaleur excédentaire à l'intérieur du bâtiment en été.

Le facteur solaire des fenêtres orientées ouest reste le paramètre qui a le plus d'impact sur le taux d'inconfort d'été. Il est à noter que la surventilation à Errachidia prend une valeur négative contrairement au cas des besoins de refroidissement, car la température extérieure pendant la nuit est moins élevée.

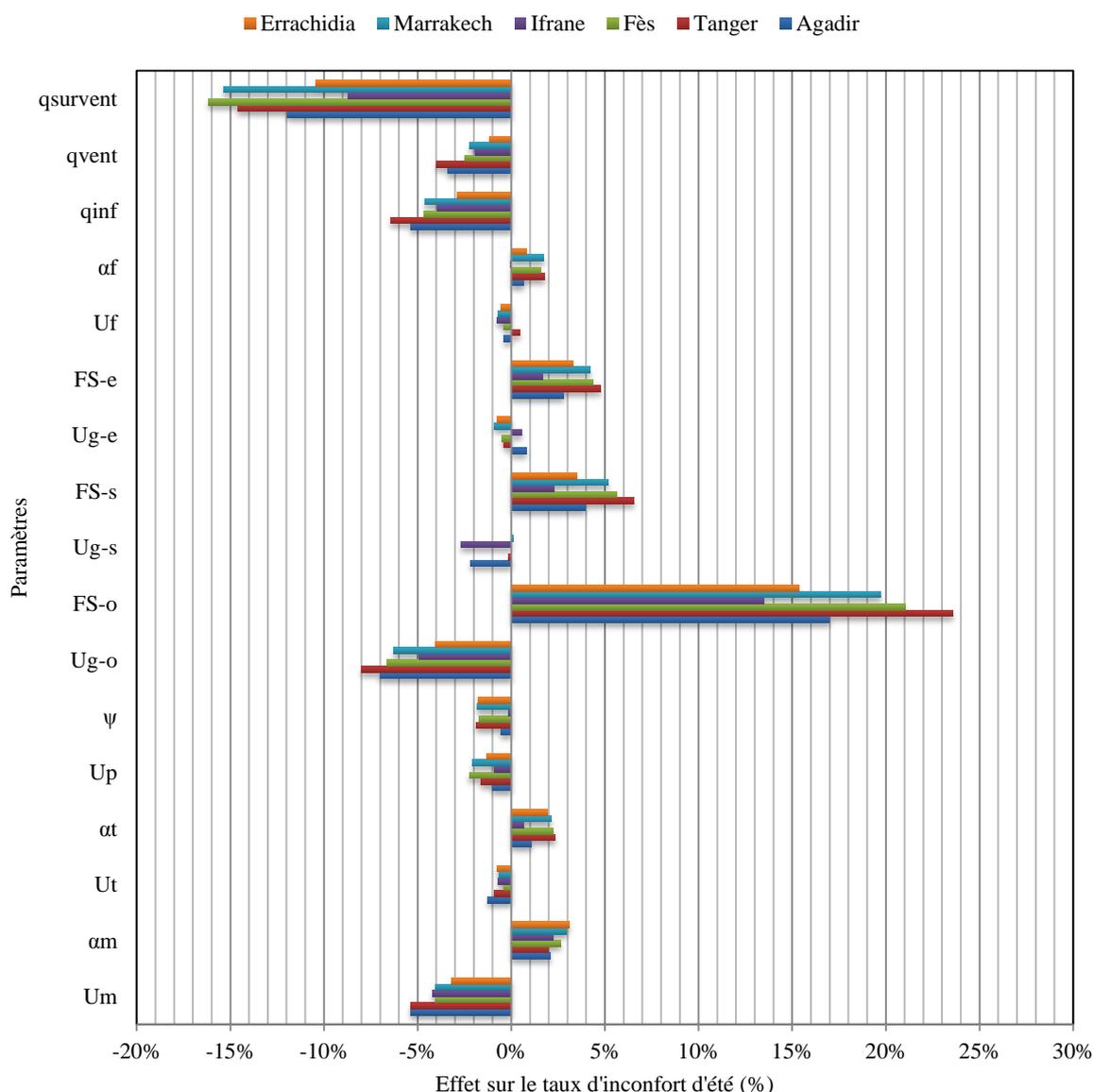


Figure 3-43 : Effets des paramètres sur le taux d'inconfort d'été pour les six zones climatiques

### 3.8 Détermination et analyse des solutions optimales

#### 3.8.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons nous servir des modèles polynomiaux développés précédemment pour réaliser une étude d'optimisation multicritère permettant de trouver des solutions techniques performantes. Les critères retenus pour la conception des bâtiments neufs au Maroc sont :

- Besoins d'énergie finale
- Surcoût d'investissement
- Coût global sur le cycle de vie
- Temps de retour sur investissement

Dans le cas où les besoins de refroidissement ne sont pas traités, le critère des besoins d'énergie finale est remplacé par les besoins de chauffage et le taux d'inconfort d'été.

Les paramètres qui ont été négligeables dans les études de sensibilités précédentes sont considérés fixes pour l'étude d'optimisation :

- Le coefficient d'absorption solaire des murs extérieurs égale à 0.5 ;
- Le plancher n'est pas isolé ;
- Le coefficient d'absorption solaire des cadres est 0.5 ;
- Le taux d'infiltration d'air égale à 0.75 v/h.

Les Tableau 3-8, Tableau 3-8, Tableau 3-8, Tableau 3-9, Tableau 3-10 et le Tableau 3-11 présentent les solutions techniques sélectionnées pour l'étude d'optimisation multicritères ainsi que les prix associés à chaque une d'elles. Une étude paramétrique complète est réalisée en utilisant la méthode que nous avons développée dans le chapitre 2. Le nombre de combinaison est de 559872. Si on considère une minute par simulation via Trnsys, le temps de calcul est de 1 an. En utilisant les modèles polynomiaux, 500 combinaisons par seconde peuvent être calculées. Ainsi, 18 minutes sont suffisantes pour la détermination des surfaces du Pareto. Dans le cas de 8 processeurs utilisés simultanément (multiprocessing), ce temps devient 2 minutes et 25 secondes.

Tableau 3-6 : Surcoûts d'investissement et d'entretien en fonction de l'épaisseur d'isolation des murs extérieurs et de la toiture.

Epaisseur d'isolation	Surcoût d'achat et de mise en œuvre en DH	Surcoût d'entretien en DH
<b>Isolation des murs extérieurs par polystyrène expansé avec une conductivité de 0.039</b>		
2 cm	26800.704	2675.12
6 cm	43519.728	4350.64
10 cm	60219.712	6026.16
14 cm	76929.216	7701.68
18 cm	93638.72	9377.2
22 cm	110348.224	11052.72
<b>Isolation de la toiture par polystyrène expansé avec une conductivité de 0.039</b>		
2 cm	4773	477.3
6 cm	11736	1175
10 cm	18690.6	1868.1
14 cm	25649.4	2563.5
18 cm	32608.2	3258.9
22 cm	39567	3954.3

Tableau 3-7 : Surcoûts d'investissement et d'entretien pour les différents vitrages.

Type de Vitrage	Ug	FS	Surcoût d'achat et de mise en œuvre en DH	Surcoût d'entretien en DH
VTR1 : Simple vitrage 4 mm	5.8	0.86	0	0
VTR 2 : Double vitrage 4/6 air/4	3.3	0.77	735.17	276.64
VTR 3 : Double vitrage 4/16-argon/4	2.6	0.77	1 776.99	1370.32
VTR 4 : Double vitrage 6/16-argon/4+couche faible émissivité	1.2	0.58	2 757.44	4751.6
VTR 5 : Double vitrage 6/16 air/4 + contrôle solaire	2.65	0.29	4451.66	6530.72
VTR 6 : Double vitrage 6/16argon/4 + contrôle solaire	2.5	0.29	5 240.93	7362.88

Tableau 3-8 : Les surcoûts d'investissement et d'entretien des cadres de fenêtre.

Type de cadre	U <sub>f</sub>	Surcoût d'achat et de mise en œuvre en DH	Surcoût d'entretien en DH
Aluminium	4	0	0
PVC	1.3	-10658.3825	-5433.897

Tableau 3-9 : Surcoûts d'investissement et d'entretien dans le cas de traitement des ponts thermiques.

Type de traitement	Surcoût d'achat et de mise en œuvre en DH	Surcoût d'entretien en DH
Sans traitement	0	0
Isolation	2603.2	260

Tableau 3-10 : Surcoûts d'investissement et d'entretien des systèmes de ventilation.

Type de ventilation	Surcoût d'achat et de mise en œuvre en DH	Surcoût d'entretien en DH
Ventilation simple flux	0	0
Ventilation double flux avec un rendement de 0.9	11223.13	9539.65
Surventilation mécanique nocturne (2.5v/h)	137.76	0
Surventilation mécanique nocturne (5v/h)	275.52	0

Tableau 3-11 : Surcoûts d'investissement et d'entretien des peintures.

Couleur	Coefficient d'absorption solaire	Surcoût d'achat et de mise en œuvre en DH	Surcoût d'entretien en DH
Blanche	0.1	0	0
Rouge	0.5	0	0
Noir	0.9	0	0

### 3.8.2 Evaluation du compromis entre les besoins d'énergie finale et les impacts économiques.

Les résultats sont ici présentés sous la forme des fronts de solutions non-dominées décrivant la surface de compromis permettant d'aider à la décision multicritère. Dans cette partie on s'intéresse aux besoins d'énergie finale et aux impacts économiques. Il est à noter qu'il est difficile de visualiser et d'analyser les résultats de l'optimisation multicritère en dimension 4. C'est pour cette raison que des projections 2d sont réalisées. Les figures Figure 3-44, Figure 3-45, Figure 3-46, Figure 3-47, Figure 3-48 et Figure 3-49 présentent les surfaces de compromis entre les différents critères. À chaque niveau de performance, il est alors possible d'identifier des solutions techniques élémentaires pouvant être mises en œuvre.

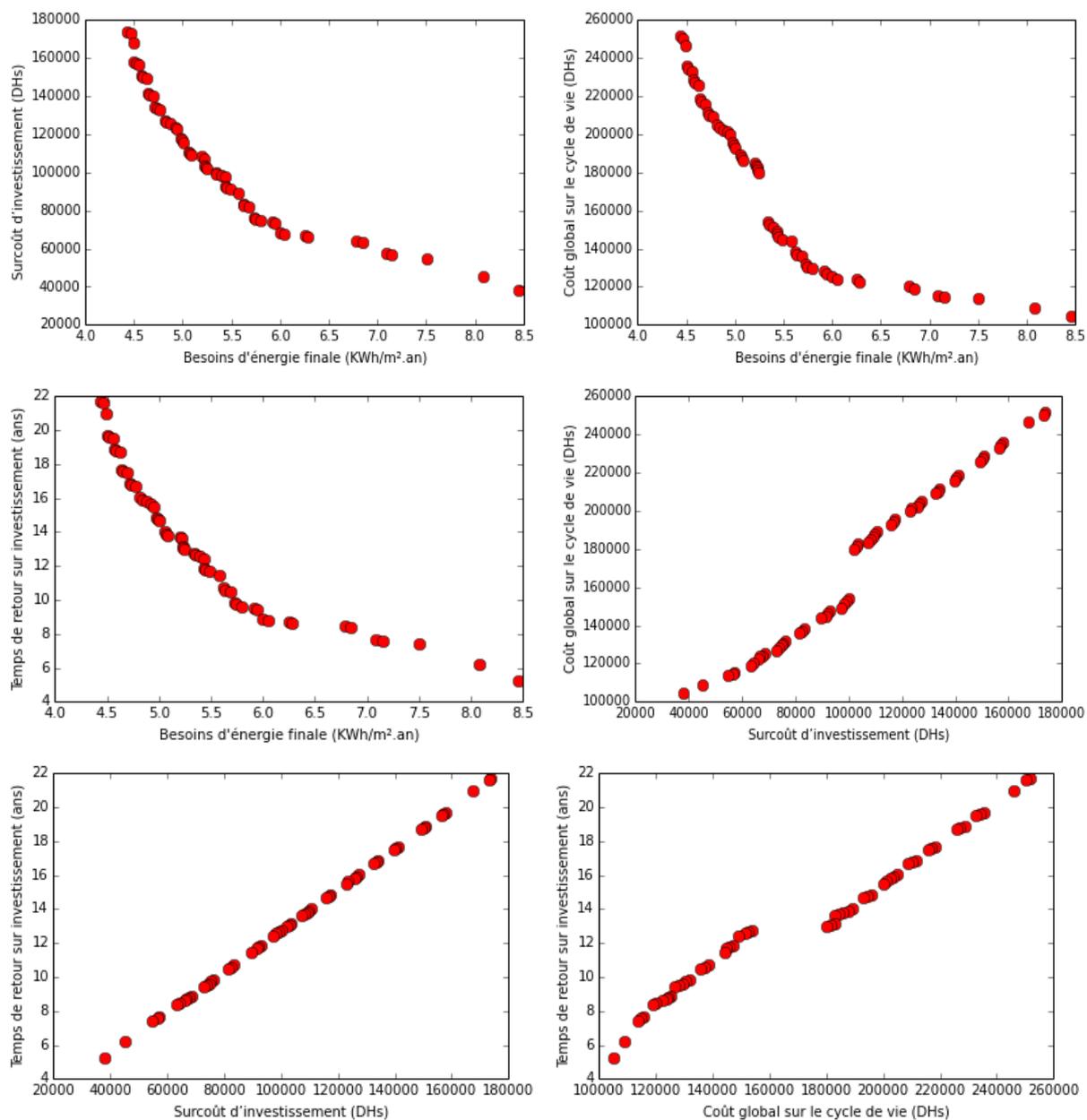


Figure 3-44 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Agadir

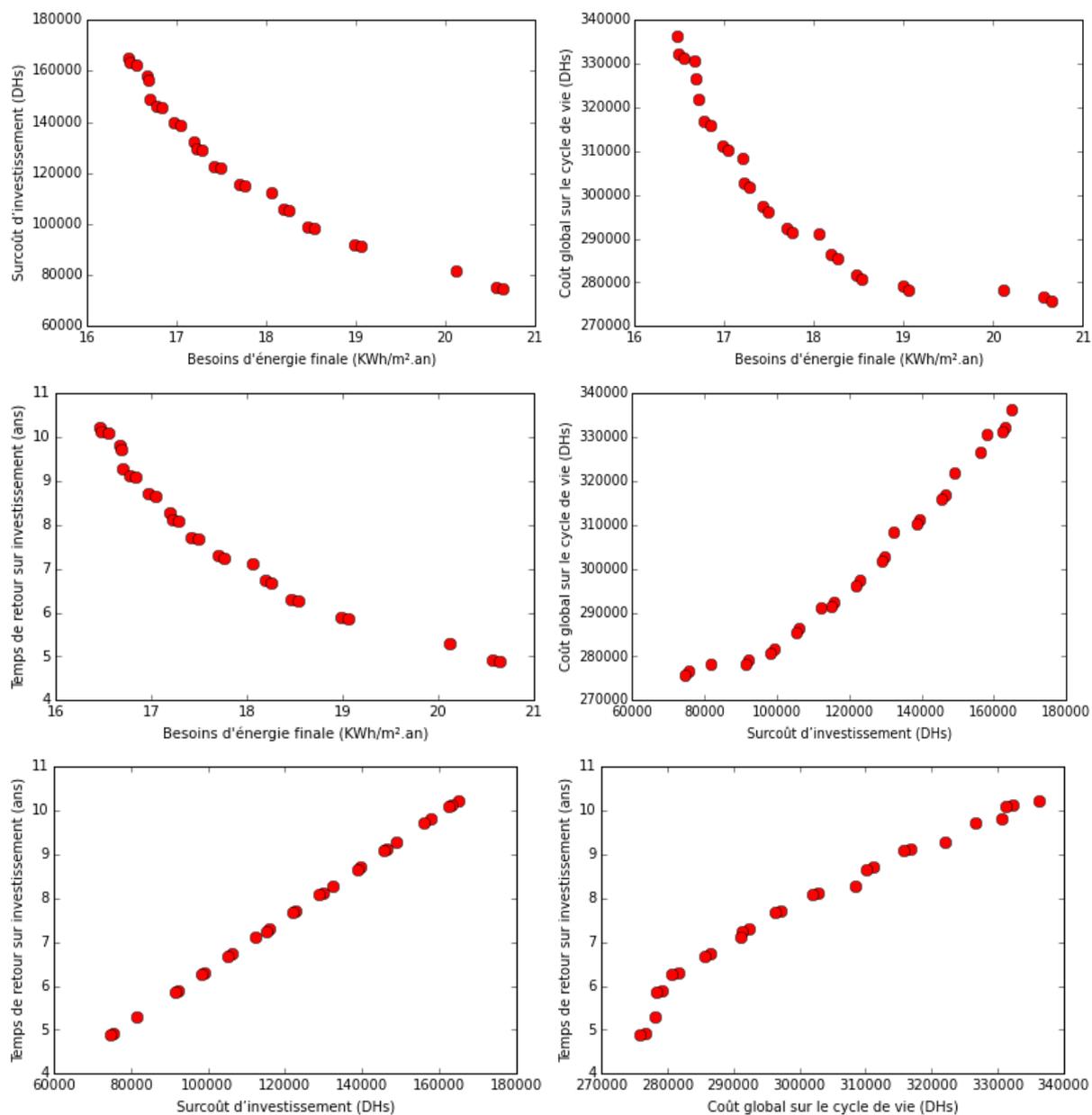


Figure 3-45 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Tanger

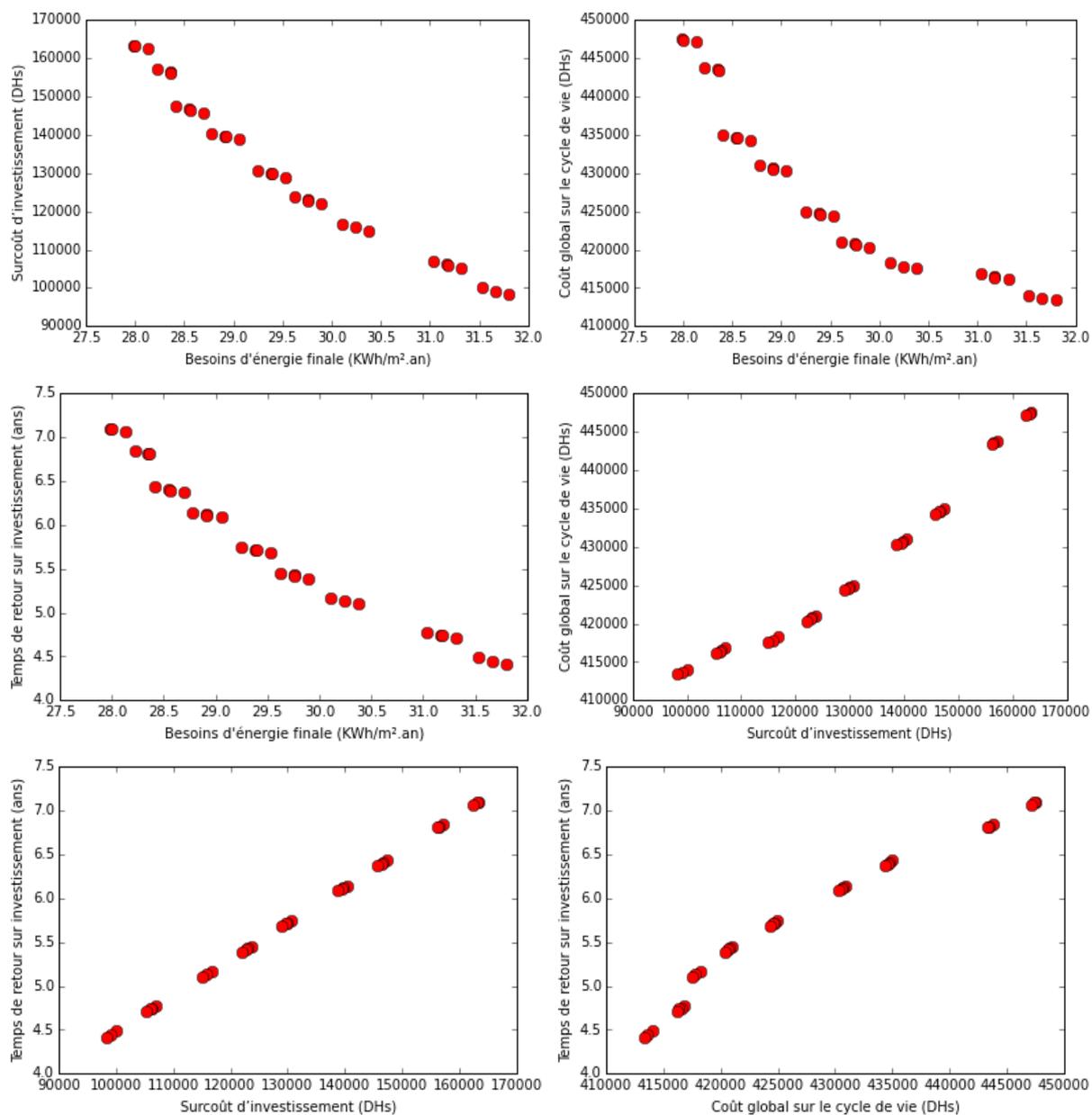


Figure 3-46 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Fès

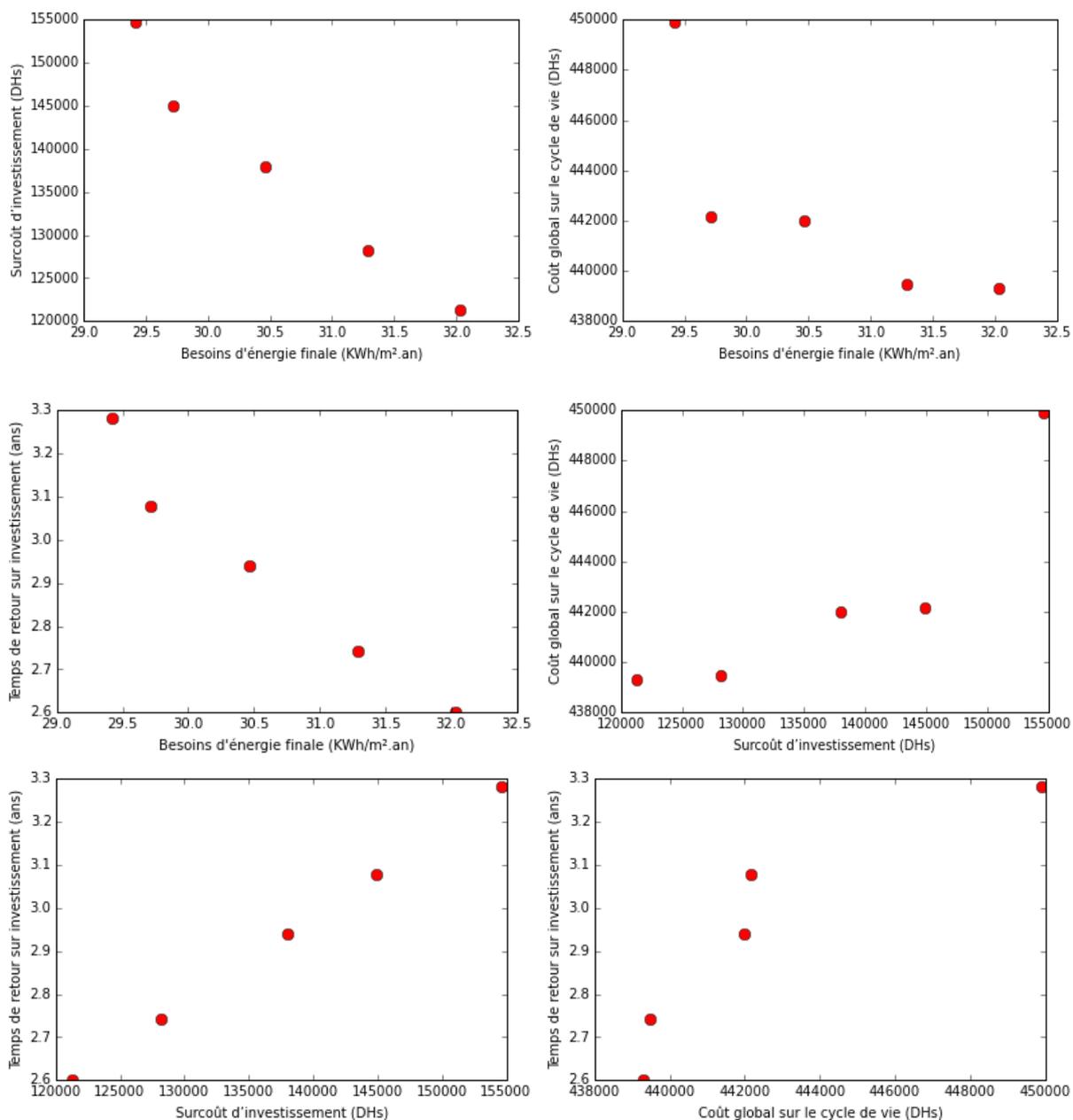


Figure 3-47 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Ifrane

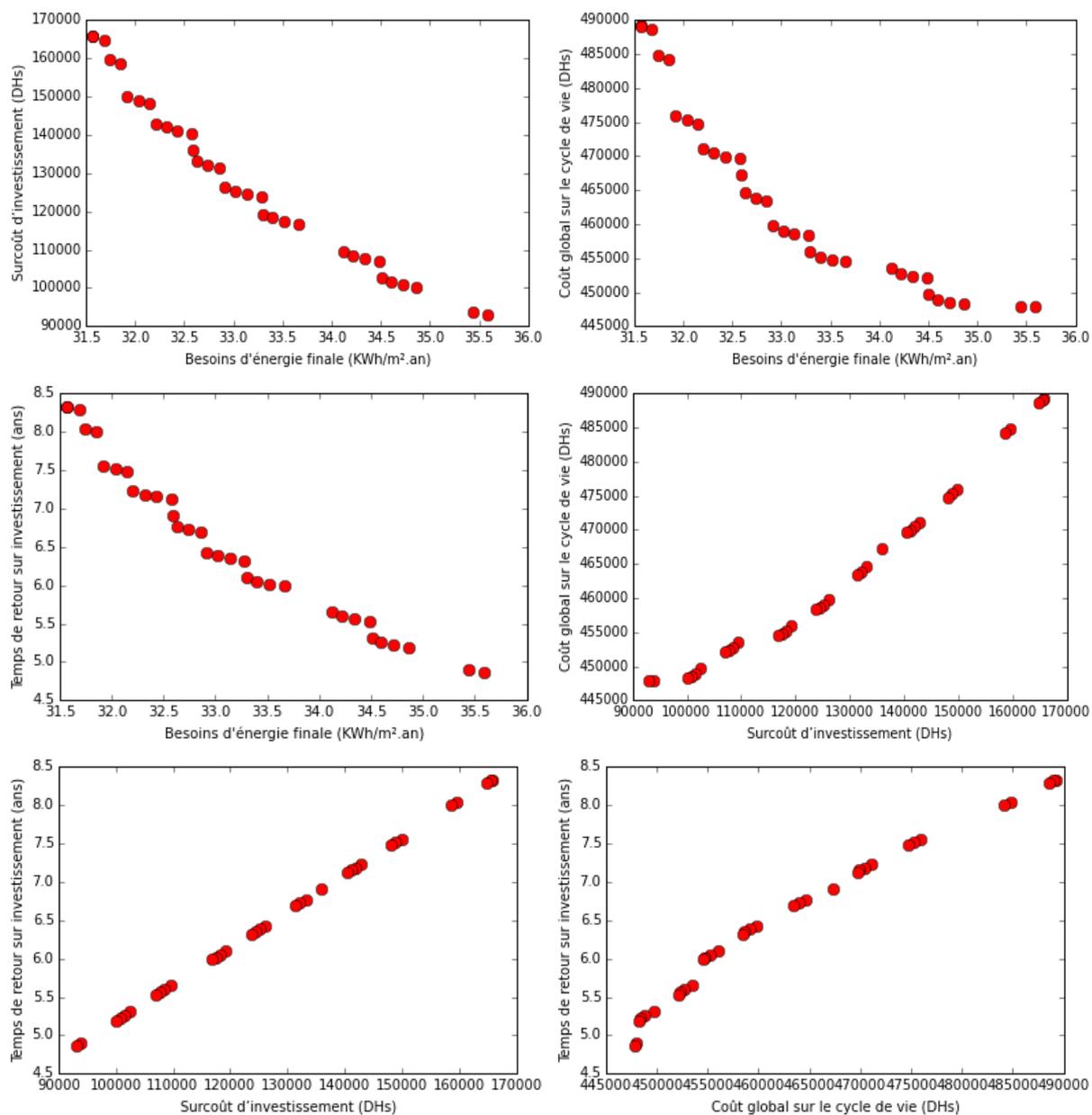


Figure 3-48 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Marrakech

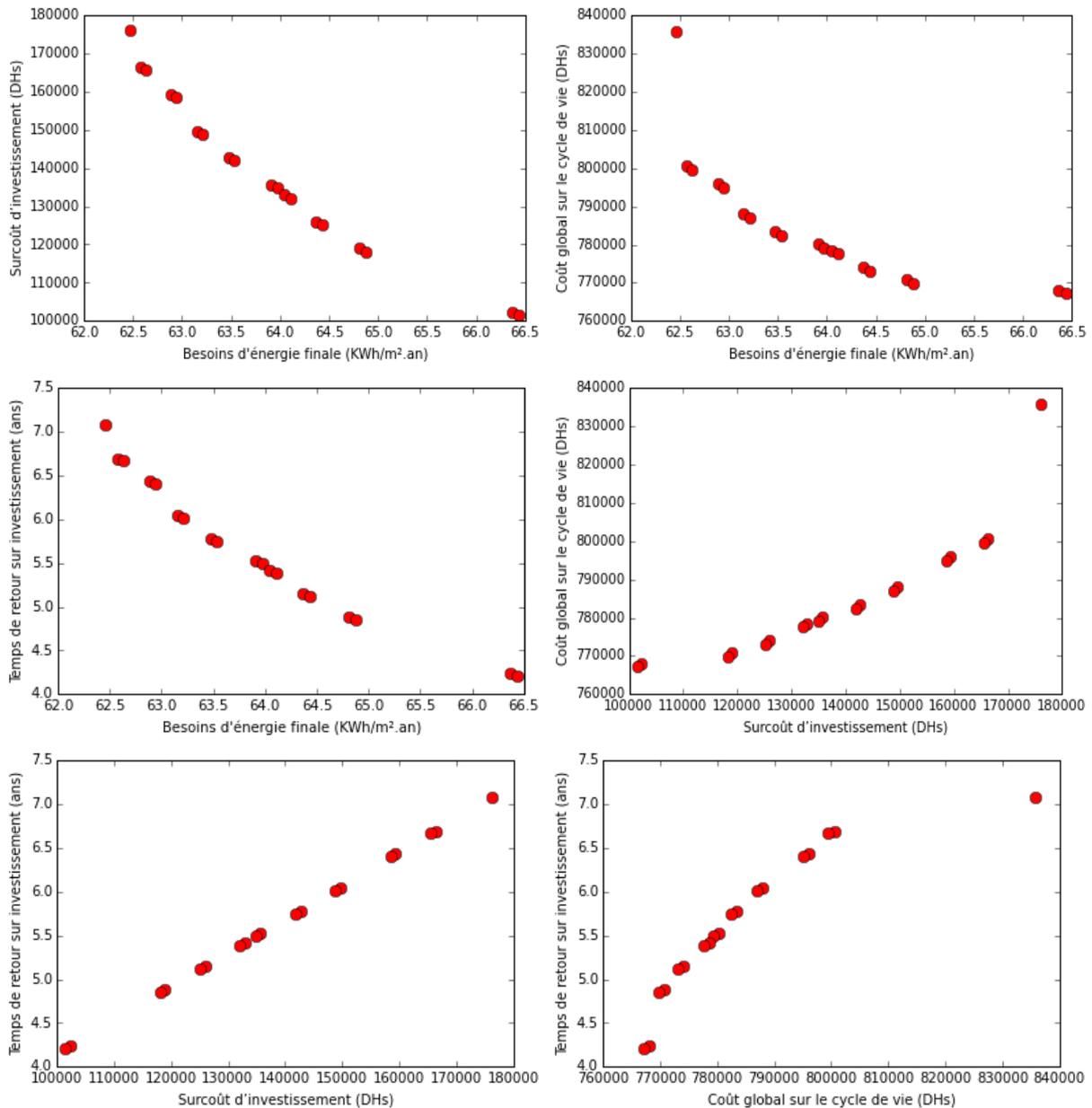


Figure 3-49 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Errachidia

On constate généralement que le nombre de solutions optimales varie pour chaque zone climatique. Pour Agadir, 58 solutions optimales ont été identifiées. Les besoins d'énergie finale obtenue sont situés entre 4.43 et 8.45 kWh/m².an. Vu ce faible écart, le choix d'un compromis entre les besoins en énergie finale et les impacts économiques n'est pas justifié. Le surcoût d'investissement et le coût global sur le cycle de vie sont multipliés par 4.5 et 2.96 respectivement. Cependant, le temps de retour sur investissement peut passer de 5.6 ans jusqu'à 21.6 ans. Nous pouvons alors retenir les solutions techniques qui satisfont la valeur 8.5 kWh/m².an avec un temps de retour sur investissement de 5.6 ans. Ce qui correspond à un surcoût d'investissement et un coût global sur le cycle de vie de l'ordre de 38036 et 104804 DHs respectivement. Avec cette valeur les besoins en énergie finale sont réduits de 81.03 % par rapport au cas de référence et de 78.87% par rapport aux exigences réglementaires.

Le même raisonnement peut être effectué pour les autres zones climatiques à l'exception d'Errachidia. Dans ce cas, la surface du compromis contient deux solutions qui ne satisfont pas les exigences de la RTCM et qui doivent donc être écartées. Finalement, la valeur élevée des besoins d'énergie finale permet de conclure que des solutions techniques plus performantes surtout dans la période d'été doivent être envisagées pour cette localité.

Le Tableau 3-12 présente les solutions retenues pour un meilleur choix lors de la conception du bâtiment étudié. L'épaisseur de l'isolation des parois opaques est donc comprise entre 10 et 14 cm dans la majorité des cas. À Agadir et Ifrane, une faible épaisseur d'isolation est largement suffisante. Pour réfléchir le maximum du rayonnement solaire et diminuer les besoins de refroidissement une peinture ou revêtement 'cool roof' est nécessaire sur l'ensemble du pays. Sur la façade Ouest, des vitrages à contrôle solaire sont alors retenus. Pour Errachidia et Marrakech, ce type de vitrage est aussi nécessaire sur la façade Ouest. Alors que sur la façade Est le double vitrage est nécessaire pour réduire que la transmission thermique sans réduire le rayonnement solaire. Les ponts thermiques doivent être traités dans toutes les villes ce qui permet aussi d'éviter les problèmes de moisissure causés par l'humidité. Comme prévu, les cadres des fenêtres en pvc sont recommandés. Une ventilation simple flux est suffisante à Agadir alors que dans les autres villes une ventilation double flux est nécessaire. La surventilation nocturne en été permet de réduire les besoins de refroidissement dans la majorité des villes. Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette stratégie n'est pas recommandée à Errachidia si le conditionnement à l'intérieur du bâtiment est fixé à la température de consigne de 26°C.

Le temps de retour sur investissement permet aux décideurs d'apprécier ou non la rentabilité des solutions optimales. Ceci permet alors de savoir le nombre d'années nécessaires pour couvrir le surcoût d'investissement par le gain annuel sur la facture d'énergie. En moyenne, sur l'ensemble du pays, le TRI est d'environ 5 ans, à l'exception d'Ifrane. Les solutions optimales dans ce cas sont très rentables avec un TRI de l'ordre de 3,2 ans. Cependant le TRI reste à la limite de la zone de décision favorable à l'investissement pour une grande partie des décideurs dans les six zones climatiques.

Tableau 3-12 : Les solutions optimales retenues dans le cas de quatre critères.

Ville	BEF (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Surcoût (DHs)	LCC (DHs)	TRI (ans)	Eim (cm)	Eit (cm)	$\alpha_t$	TPT	VIT-Ouest	VIT-Sud	VIT-Est	Type de cadre	VENT	Taux de survent (v/h)
Agadir	8.4	38036	104804	5.2	2	6	0.1	Oui	VIT 5	VIT 1	VIT 3	PVC	SF	5
Tanger	20.6	74639	275778	4.8	6	10	0.1	Oui	VIT 5	VIT 3	VIT 3	PVC	DF	5
Fès	31.8	98298	413379	4.4	10	14	0.1	Oui	VIT 5	VIT 3	VIT 3	PVC	DF	5
Ifrane	32.0	121253	439287	2.6	14	18	0.1	Oui	VIT 4	VIT 4	VIT 3	PVC	DF	5
Marrakech	35.5	93034	447793	4.8	10	10	0.1	Oui	VIT 5	VIT 3	VIT 5	PVC	DF	5
Errachidia	64.8	118196	769909	4.8	14	14	0.1	Oui	VIT 5	VIT 4	VIT 6	PVC	DF	0

Tableau 3-13 : Les solutions optimales retenues dans le cas de cinq critères.

Ville	BCH (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Surcoût (DHs)	TI (%)	LCC (DHs)	TRI (ans)	Eim (cm)	Eit (cm)	$\alpha_t$	TPT	VIT-Ouest	VIT-Sud	VIT-Est	Type de cadre	Type Venti	Taux de survent (v/h)
Agadir	2.22	28328	1.7	28677	6.15	2	2	0.9	Oui	VIT1	VIT3	VIT4	PVC	SF	5
Tanger	4.00	101821	31.5	136727	7.82	10	18	0.9	Oui	VIT4	VIT2	VIT4	PVC	DF	5
Fès	5.37	106355	91.3	155484	6.17	14	10	0.9	Oui	VIT4	VIT3	VIT4	PVC	DF	5
Ifrane	24.04	127231	12.1	365208	2.73	14	22	0.9	Oui	VIT4	VIT3	VIT4	PVC	DF	5
Marrakech	3.13	89645	58.2	114753	7.55	10	10	0.9	Oui	VIT4	VIT3	VIT4	PVC	DF	5
Errachidia	3.83	113313	86.9	147789	6.89	14	14	0.5	Oui	VIT4	VIT6	VIT4	PVC	DF	5

BCH : Besoins de chauffage, BEF : Besoins d'énergie finale

TI : Taux d'inconfort d'été

Eim : Isolation des murs extérieurs

Eit : Isolation de la toiture

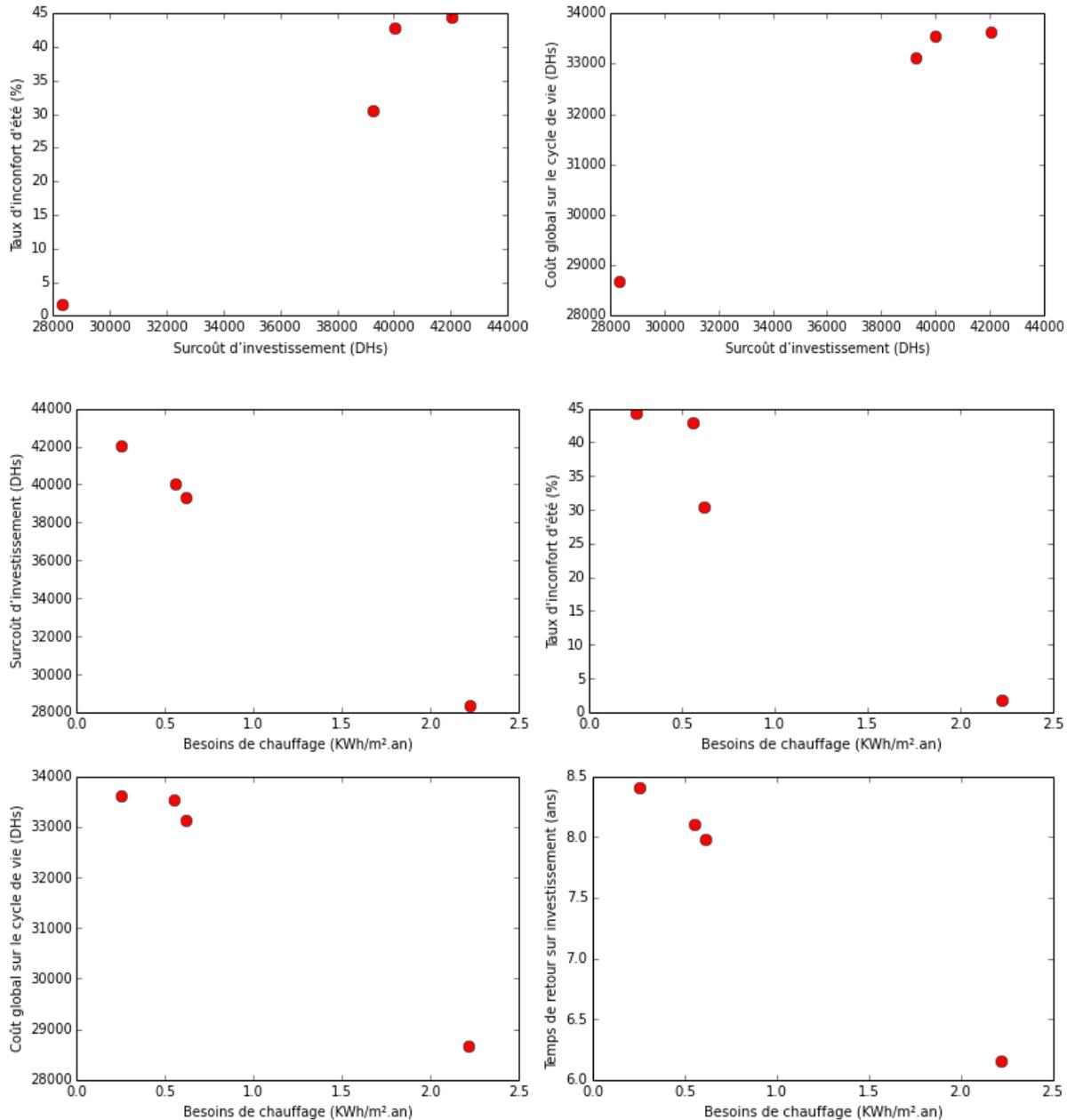
TPT : Traitement des ponts thermiques

VIT : Type de Vitrage

Type Venti : Type de ventilation, SF : Simple flux, DF double flux. Taux de survent : Taux de surventilation

### 3.8.3 Evaluation du compromis entre les besoins d'énergie finale et les impacts économiques.

Dans le cas des bâtiments non climatisés, nous utilisons les besoins de chauffage et le taux de confort adaptatif d'été ainsi que les impacts économiques comme critères. Cinq critères sont donc considérés. Les figures Figure 3-50, Figure 3-51, Figure 3-52, Figure 3-53, Figure 3-54 et Figure 3-55 présentent les surfaces de compromis entre ces différents critères.



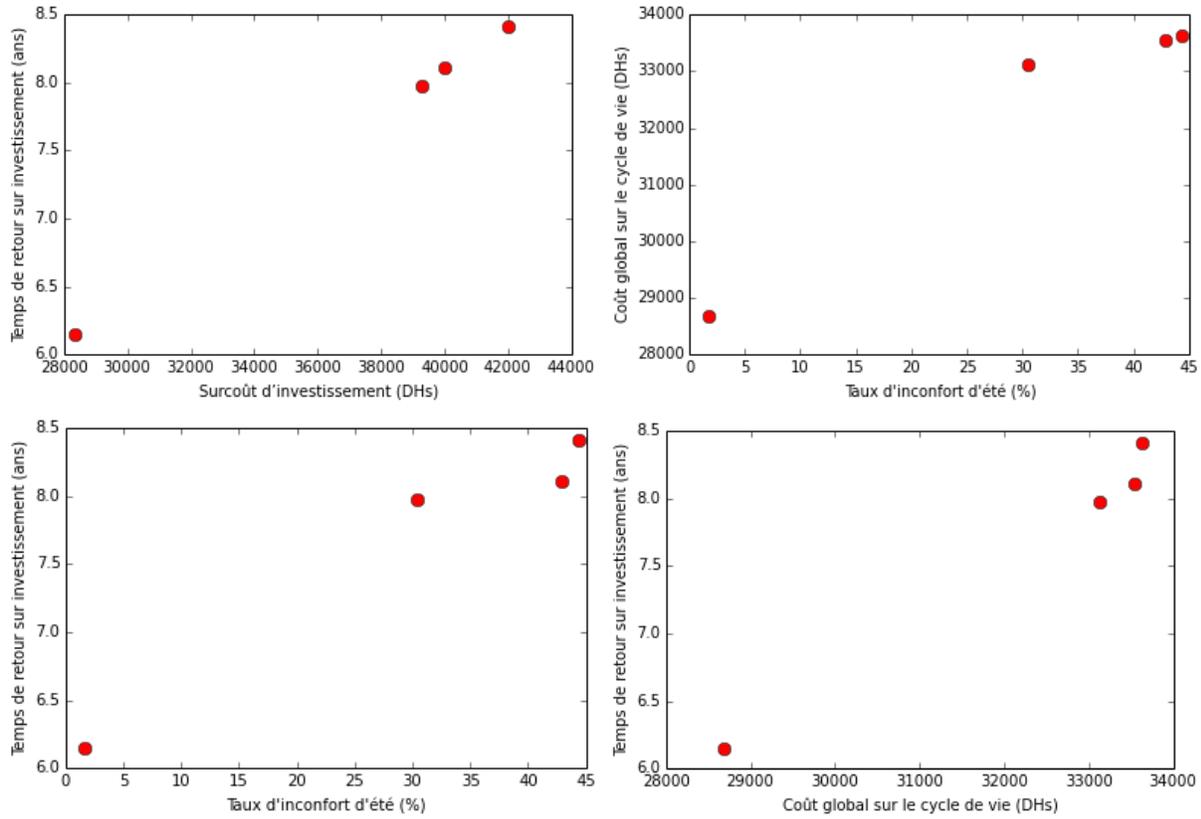
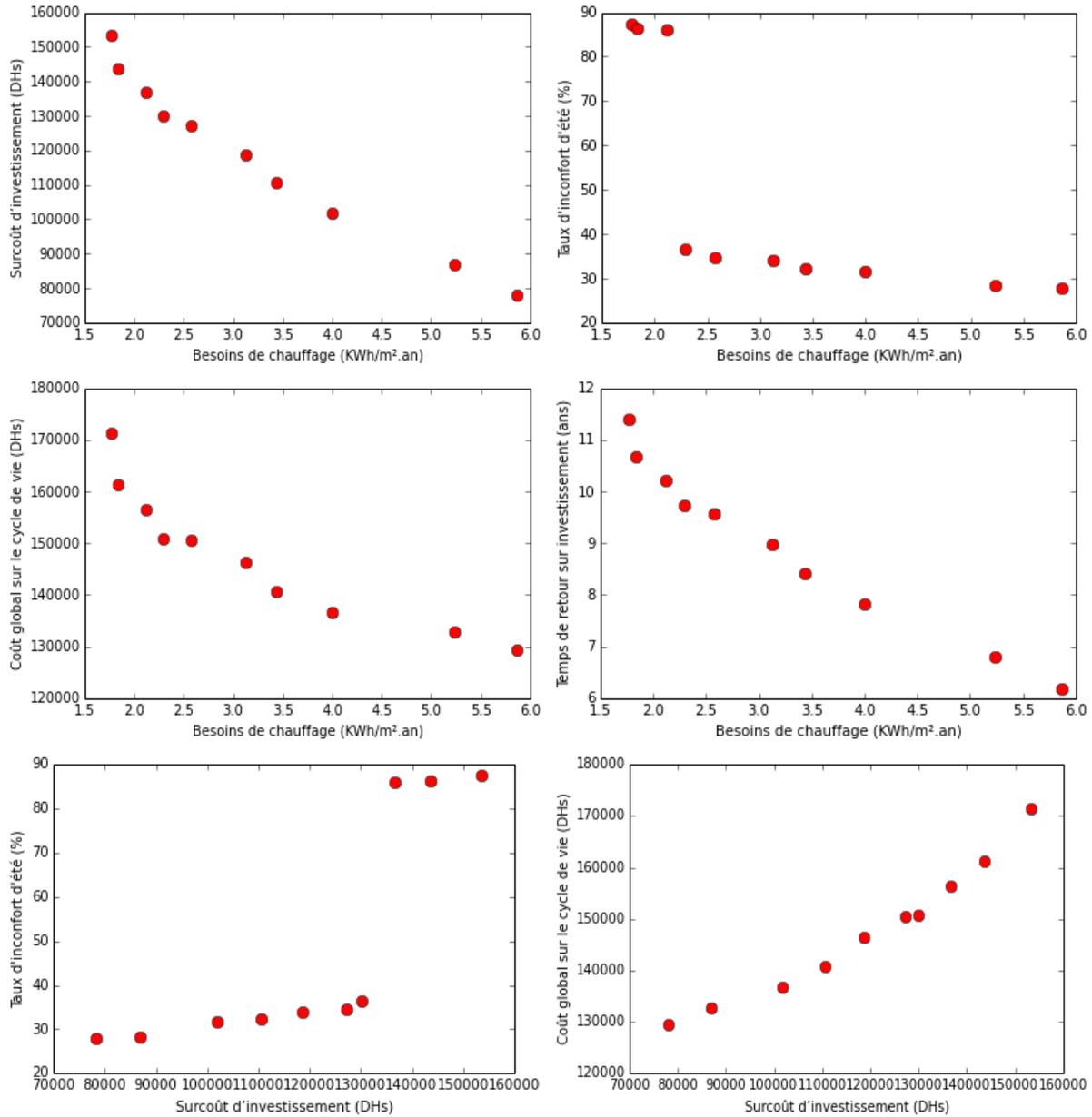


Figure 3-50 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Agadir



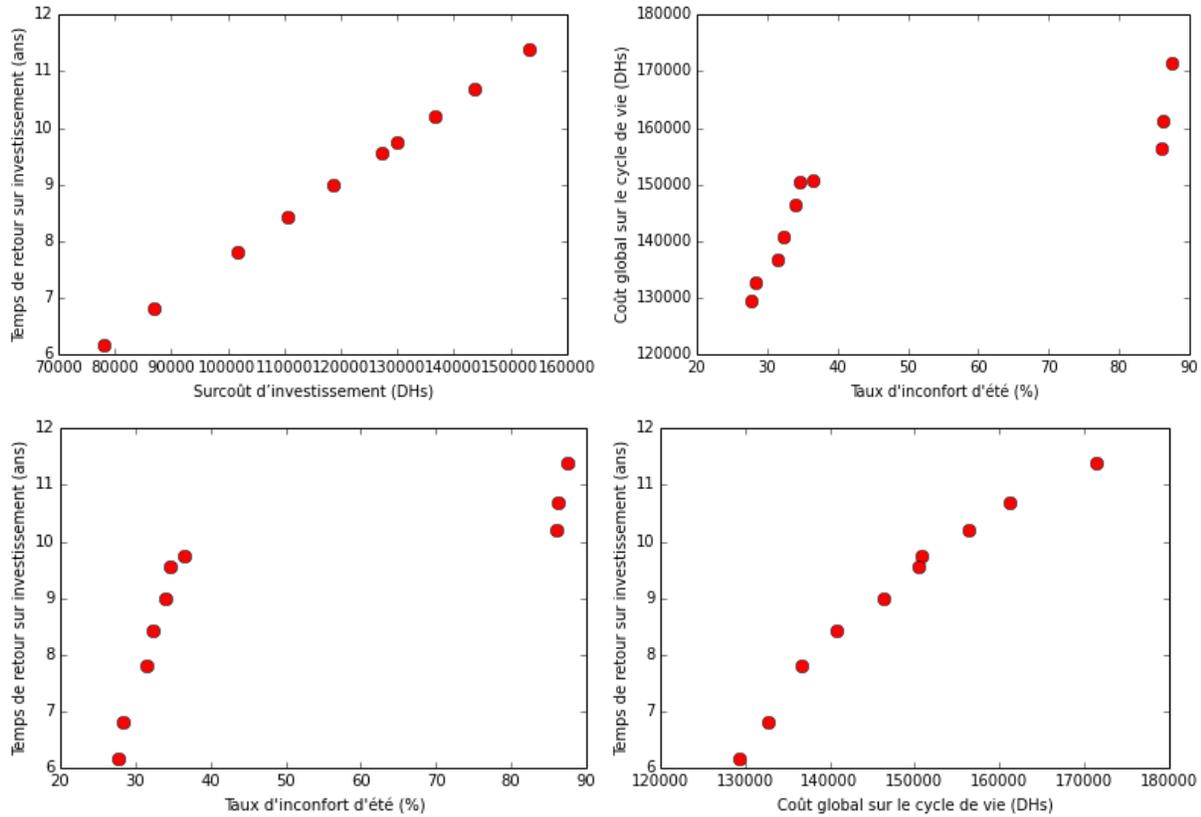
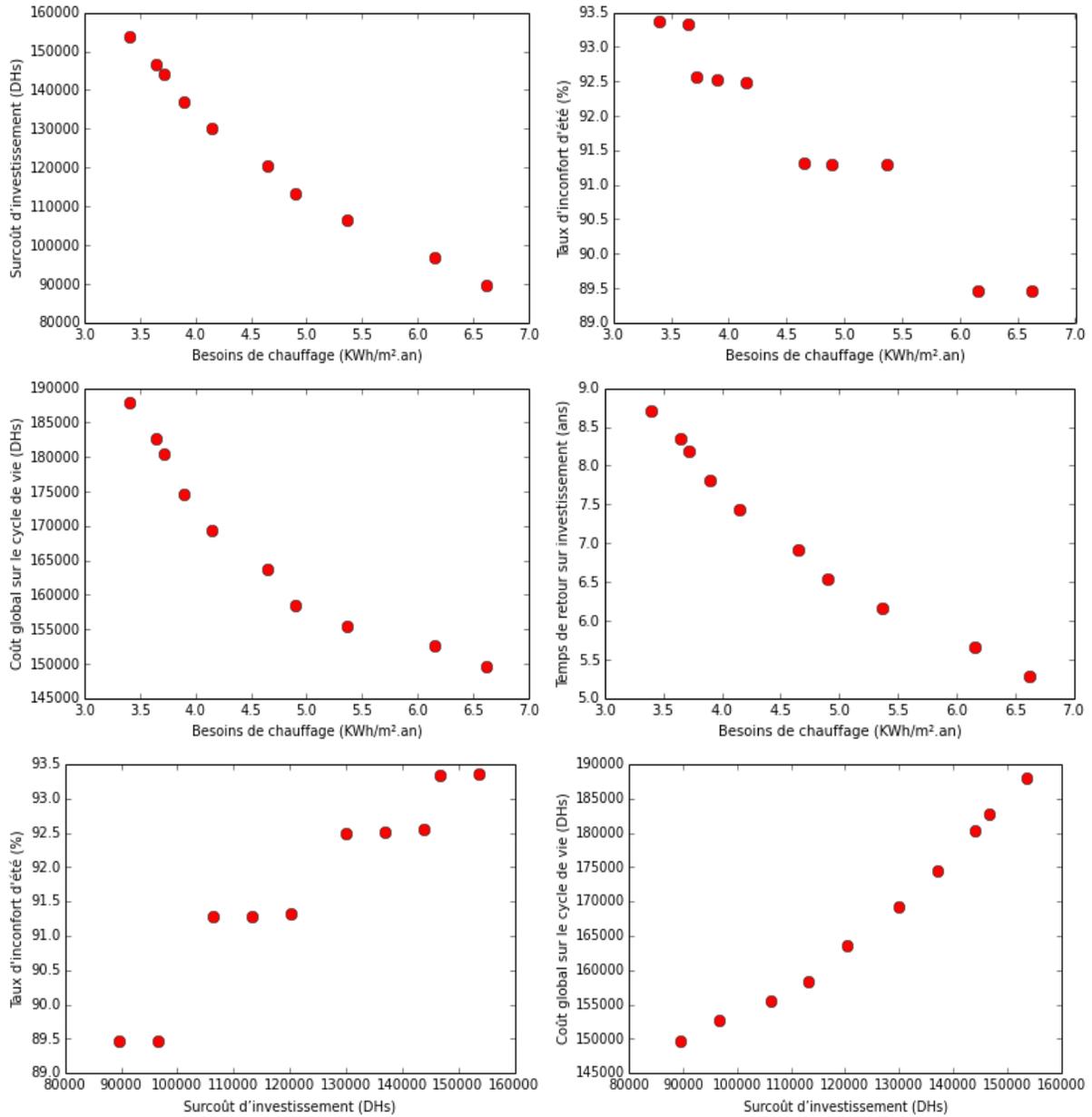


Figure 3-51 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Tanger



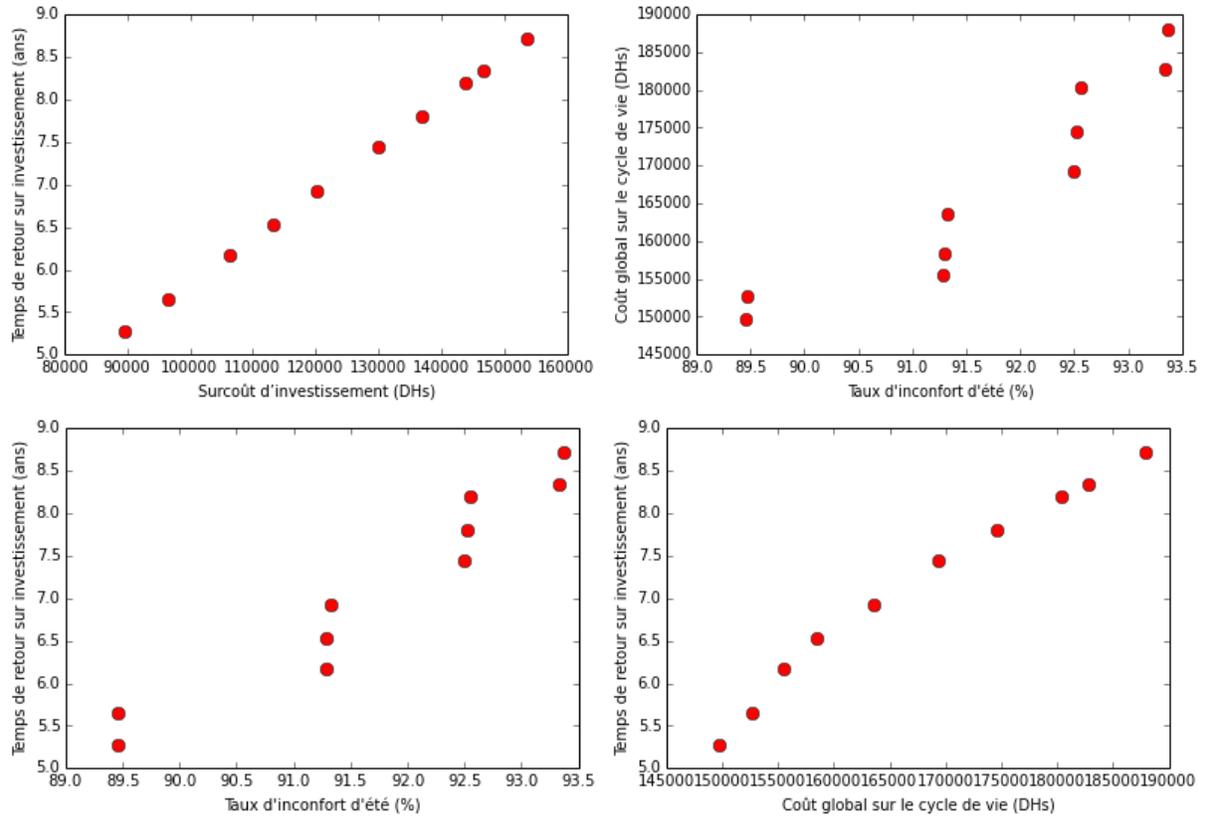
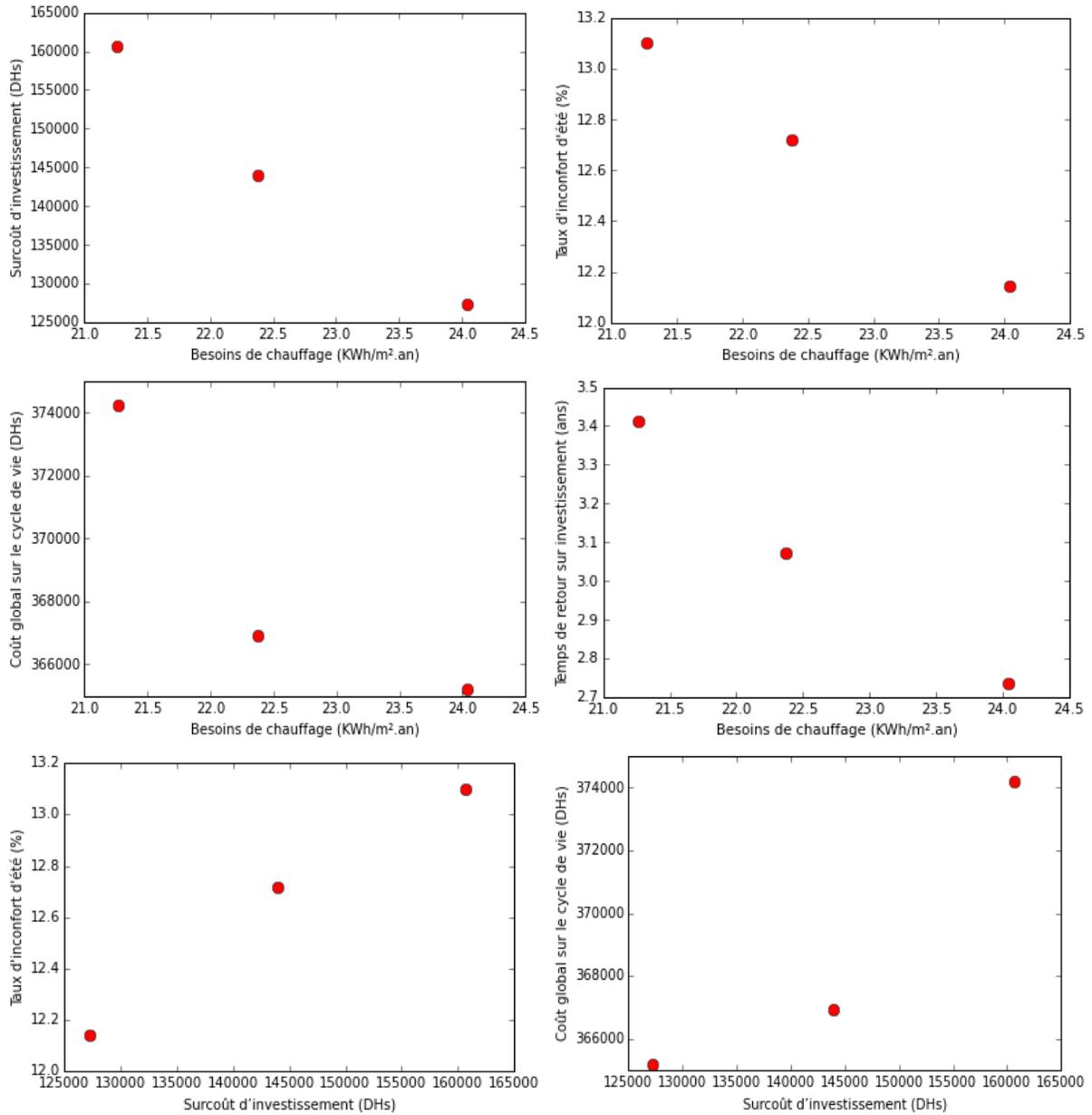


Figure 3-52 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Fès



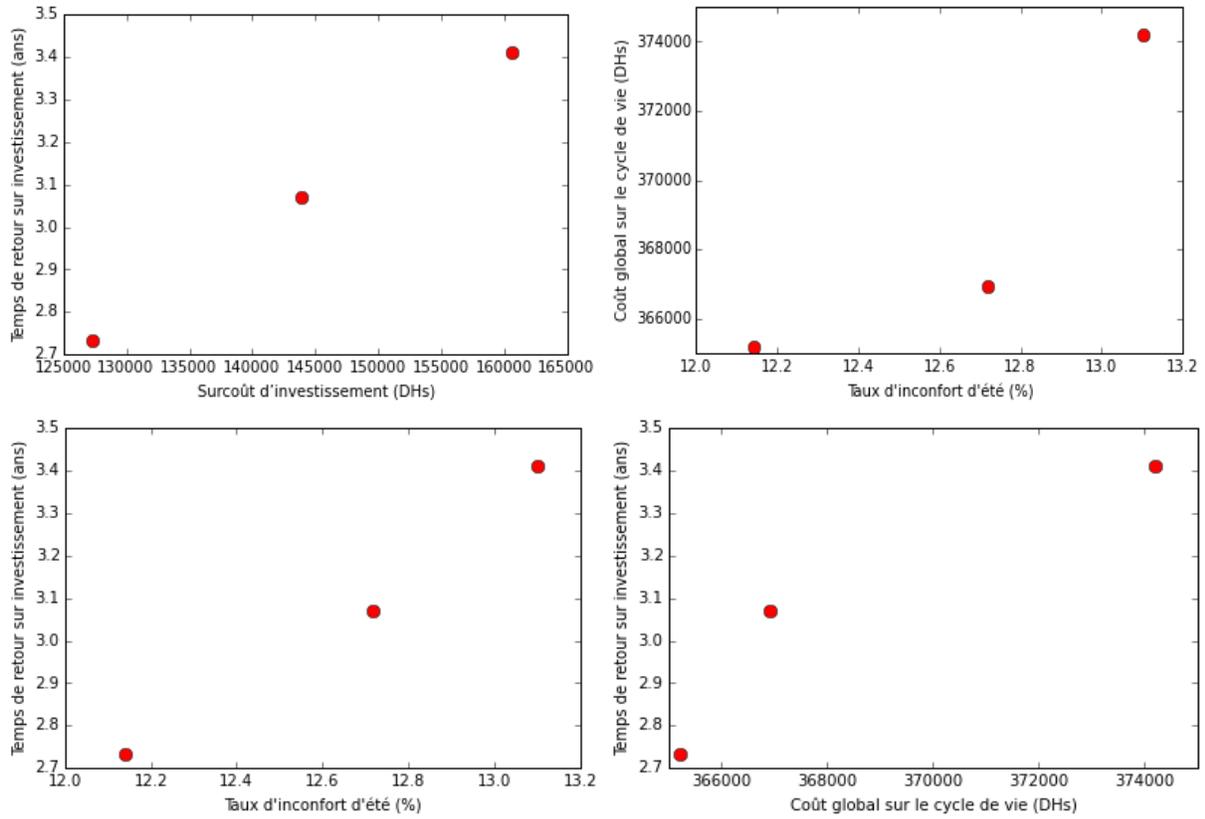
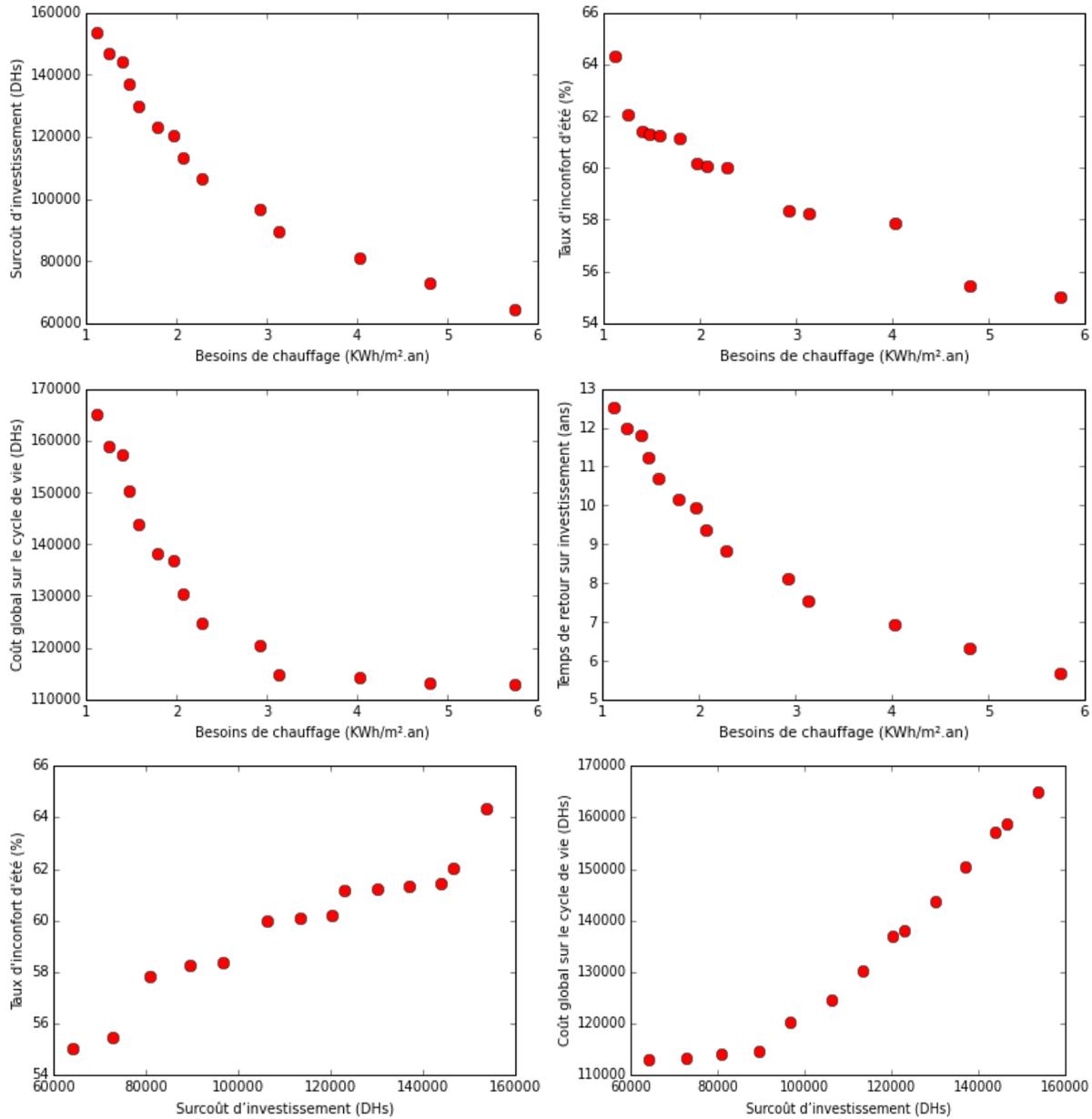


Figure 3-53 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Ifrane



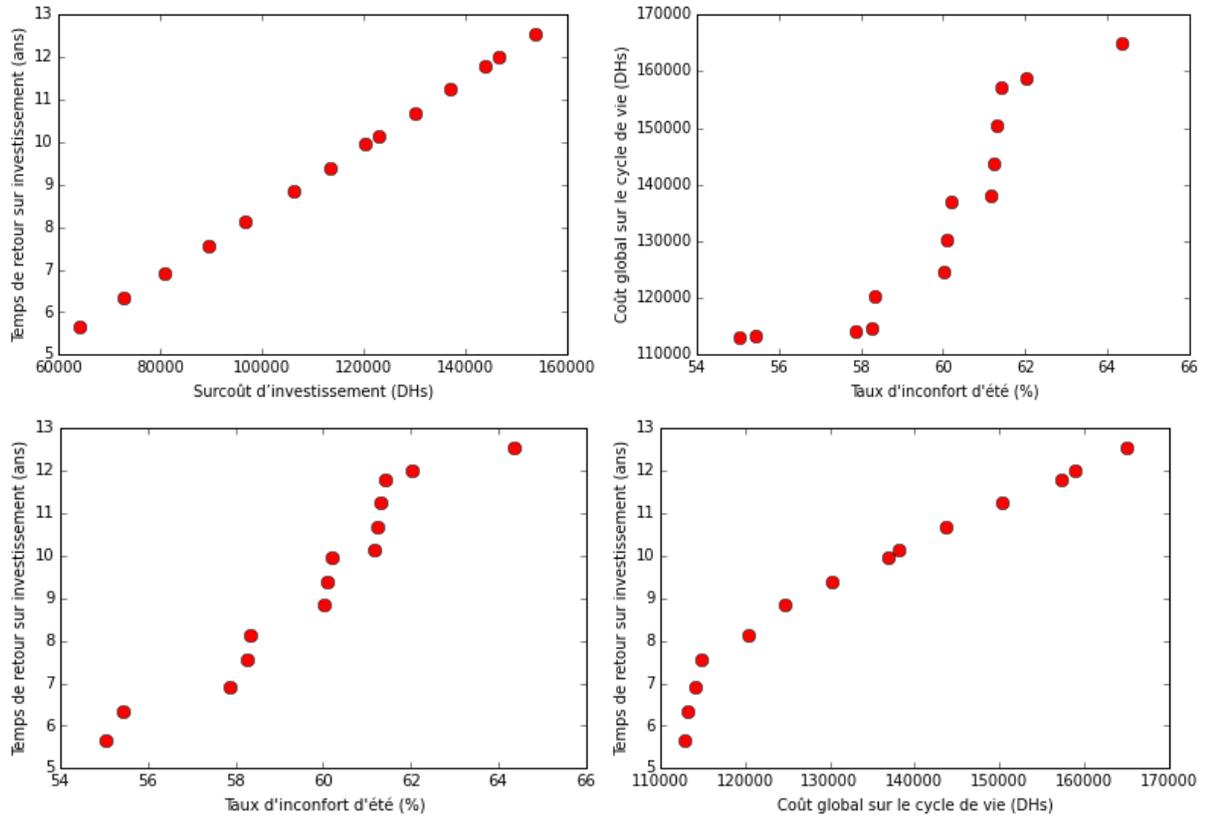
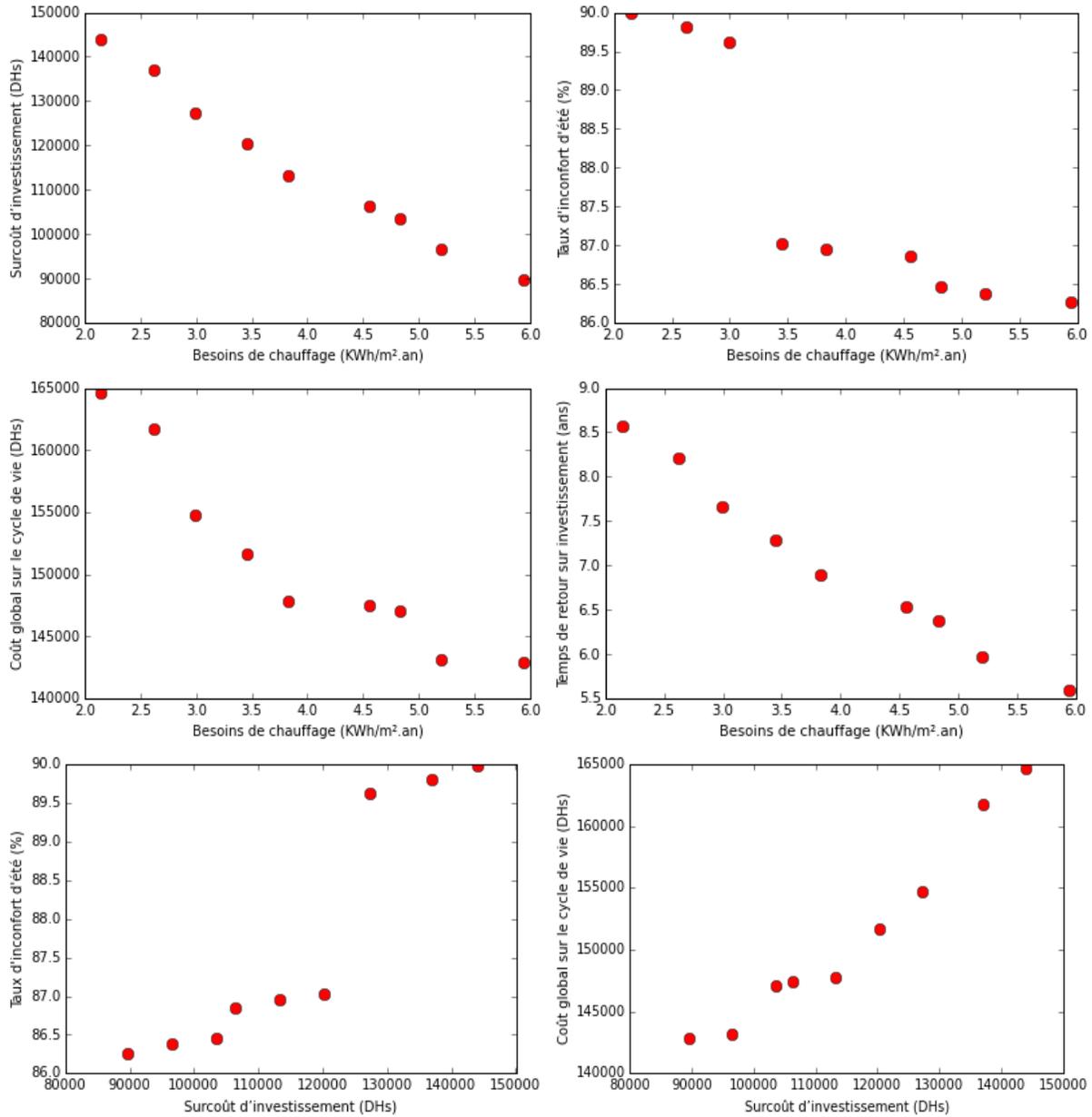


Figure 3-54 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Marrakech



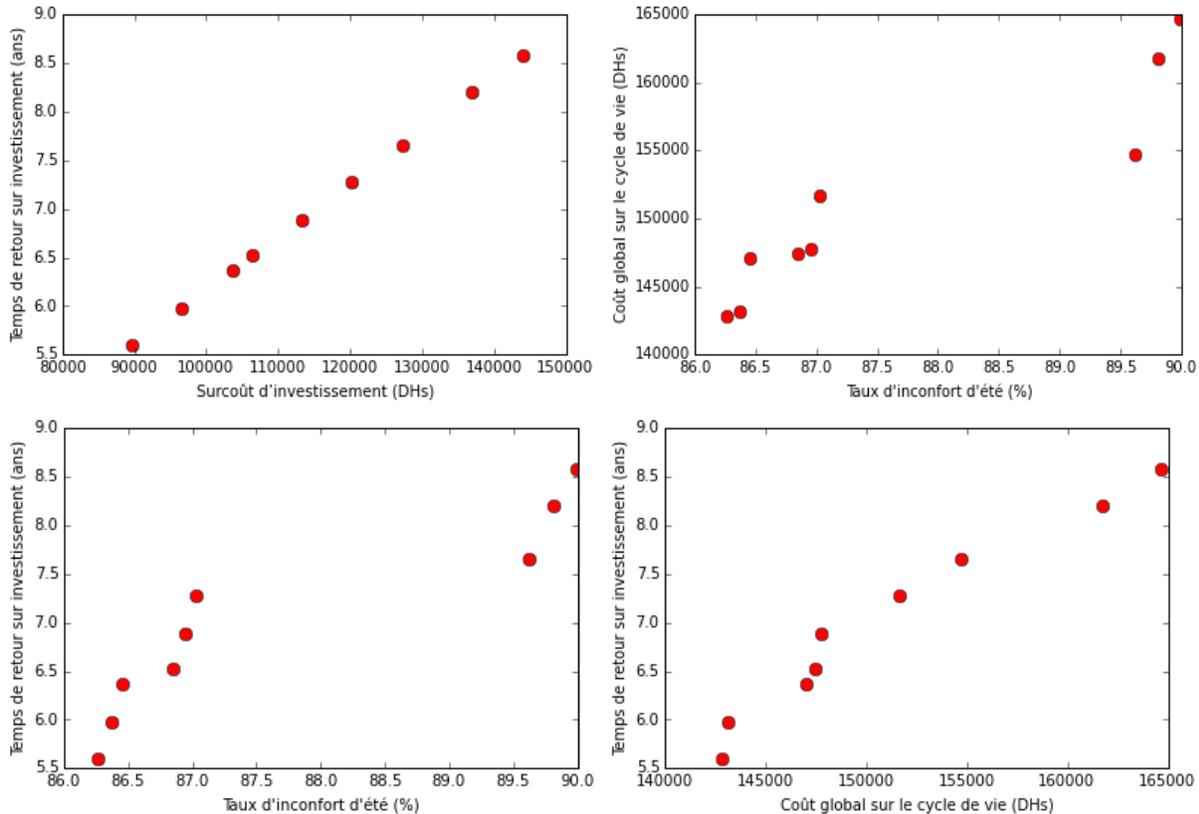


Figure 3-55 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Errachidia

Nous constatons que le nombre de solutions optimales diminue, car il devient de plus en plus difficile de satisfaire tous les critères à la fois. Dans la majorité des villes, les besoins de chauffage sont largement inférieurs à 7 kWh/m<sup>2</sup>.an. À Agadir, on peut même atteindre une valeur presque nulle. Dans le cas d'Ifrane, les solutions optimales envisagées ne peuvent réduire ces besoins en dessous de 20 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Le taux d'inconfort reste très élevé à Fès, Marrakech et Errachidia. Dans ces villes, le recours à d'autres systèmes de rafraîchissement passif ou à des systèmes de production de froid est indispensable. Le

Tableau 3-13 présente les solutions optimales obtenues par le calcul du point le plus proche du point idéal.

A titre d'exemple, pour la ville de Tanger, la solution optimale retenue permet d'obtenir une valeur de besoins de chauffage très faible et qui égale à 4 kWh/m<sup>2</sup>.an. Le taux de confort adaptatif d'été est de 31,5%. L'ensemble des techniques aboutissant à ces résultats correspondent à une isolation des murs extérieurs et de la toiture de 10 cm et 18 cm respectivement. Un traitement thermique s'avère dans ce cas nécessaire. Dans le but de minimiser les besoins de

chauffage, la valeur du coefficient d'absorption solaire obtenue est 0,9 ainsi que la ventilation mécanique double flux. Pour réduire le taux d'inconfort d'été, la surventilation mécanique nocturne avec un taux de renouvellement d'air de 5 v/h est dans ce cas primordiale. Sur les façades Est et Ouest un double vitrage faible émissivité est nécessaire alors que sur la face sur un double vitrage classique est suffisant. Le surcout engendré par la mise en œuvre de cet ensemble de solutions techniques est 101821 Dirhams (509,1 dirhams/m<sup>2</sup>). Le cout sur le cycle de vie du bâtiment sur 50 ans est 136727 Dirhams (683,6 dirhams/m<sup>2</sup>). Le temps de retour sur investissement dans ce cas est 7.82 ans.

Généralement, l'épaisseur d'isolant en toiture doit être supérieure à celle des murs extérieurs. Ces derniers atteignent leurs valeurs maximales à Ifrane et leurs valeurs minimales à Agadir. Dans le but de réduire les besoins de chauffage, une peinture sombre est envisagée dans la majorité des zones climatiques à l'exception d'Errachidia. Le traitement des ponts thermiques s'avère nécessaire. Pour les fenêtres orientées Est et Ouest, des fenêtres double vitrage avec une lame d'argon et un traitement à faible émissivité sont nécessaires. Un simple vitrage est suffisant pour la ville d'Agadir sur la façade Ouest. Concernant la face Sud, c'est le double vitrage avec une lame d'argon qui a été retenue sauf à Tanger où un double vitrage classique est suffisant. Comme prévu, c'est le cadre en pvc qui est le plus rentable et efficace énergétiquement. Une ventilation double flux est la plus optimale pour les six zones climatiques sauf à Agadir où une ventilation simple flux est largement suffisante. La surventilation mécanique est nécessaire avec le maximum de débit pour réduire le taux d'inconfort en été.

Le temps de retour se situe en moyenne à 7 ans à l'exception d'Ifrane dans ce cas le temps de retour est que de 2.73 ans. Le surcoût d'investissement varie selon la zone climatique entre 141 Dirhams par m<sup>2</sup> pour Agadir et 636 Dirhams par m<sup>2</sup> pour Ifrane alors que pour le cycle de vie il varie entre 143 Dirhams par m<sup>2</sup> pour Agadir et 1826 Dirhams par m<sup>2</sup> pour Ifrane.

### 3.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer comment et en quoi la méthode d'optimisation multicritère que nous avons développée peut contribuer à l'aide à la décision sur une base multicritère et sur le cycle de vie pour la conception des bâtiments neufs au Maroc.

Les besoins énergétiques et le taux d'inconfort thermique d'été estimés par les modèles polynomiaux permettent une prédiction satisfaisante. L'utilisation de ces modèles permet de garantir l'atteinte du Front de Pareto optimal théorique avec une bonne précision.

L'application à une étude de cas a démontré la possibilité d'identifier un ensemble de solutions techniques efficaces sous forme de surface de compromis entre les différents critères pris en considération.

L'étude de cas a aussi permis de souligner la richesse de l'information issue de l'optimisation. Le nécessaire compromis entre réduction des besoins énergétiques, confort d'été et impacts économiques a été mis en évidence.

Nous pouvons aussi conclure que dans le cas des bâtiments non climatisés, des solutions techniques très simples peuvent contribuer à des bâtiments à énergie zéro au Maroc et surtout si le taux d'inconfort est amélioré par d'autres stratégies de rafraîchissement passif ou par l'intégration des énergies renouvelables.

---

## **Chapitre . 4 : Application à la réhabilitation des bâtiments existants en France**

---

#### 4.1 Introduction

Après avoir utilisé notre méthode à la conception optimisée de bâtiments neufs au Maroc, nous nous proposons de l'appliquer à la réhabilitation de bâtiment existant. L'exemple choisi ici est un bâtiment d'habitat social localisé à La Rochelle. Ce bâtiment fait l'objet d'une réhabilitation à forte efficacité dans le cadre du projet Rupella Rehab (L'office public de l'habitat de l'agglomération de La Rochelle, 2013).

Porté par l'Office Public de l'Habitat de l'Agglomération de La Rochelle et coordonné par la Plateforme Tipee (Plateforme technologique dédiée à la réhabilitation des bâtiments), Rupella-Reha est lauréat d'un projet d'investissement d'avenir en réponse à l'Appel à Manifestation d'intérêt (AMI) lancé par l'ADEME sur le thème « Bâtiments et îlots à énergie positive et à bilan carbone minimum ».

D'une durée de 5 ans et demie, ce projet consiste à réhabiliter en approche globale trois bâtiments en site occupé de l'OPH (Office Public de l'Habitat) de La Rochelle. Sélectionnés du fait de leurs typologies constructives et de leurs périodes de construction différentes, étalées entre 1954 et 1974, ces bâtiments sont représentatifs d'une large partie du parc des bailleurs au niveau national, et de Poitou-Charentes en particulier. Sur la base de ces trois immeubles, il sera développé des solutions technologiques ainsi que des méthodologies de projet innovantes afin de démontrer que des performances énergétiques ambitieuses, au-delà des standards habituels de l'OPH sont possibles, à la fois techniquement, économiquement, et avec moins d'impact sur l'environnement. L'objectif énergétique à atteindre pour le bâtiment étudié dans le cadre de ce travail est de réaliser une réhabilitation exemplaire à 50 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>.an.

Dans ce contexte et afin de répondre à cet objectif, notre étude a pour objectif de fournir une aide à la décision permettant de déterminer le compromis entre les critères énergétiques, économiques et environnementaux pour les travaux de réhabilitation de ce bâtiment.

Pour l'identification des programmes de réhabilitation optimaux dès la phase de conception, un audit énergétique du bâtiment existant doit être effectué. Ceci permet de réaliser une analyse des conditions de fonctionnement du bâtiment afin d'établir un diagnostic de ces performances énergétiques et de ces émissions de gaz à effet de serre.

Ensuite, la modélisation numérique peut être effectuée pour contribuer à l'amélioration des performances énergétiques par l'étude des stratégies de réhabilitation par rapport à l'état du bâtiment. C'est dans cette étape que notre méthode d'optimisation multicritère sera appliquée. De façon concrète, on précèdera dans un premier temps au développement des modèles polynomiaux permettant la prédiction des besoins énergétiques et du confort thermique d'été. Les stratégies retenues seront alors évaluées sur le cycle de vie du bâtiment en fonction des critères de décision retenus.

## 4.2 Description et diagnostic du bâtiment étudié

### 4.2.1 Géométrie

Le bâtiment étudié est un immeuble collectif d'habitat social appartenant à l'Office HLM de la Rochelle (Figure 4-1). Sa construction a été achevée en 1954, bien avant l'introduction de la première réglementation thermique en France (1975). Il comporte quatre étages dont chacun est composé de deux appartements de type T1 d'une surface de 26 m<sup>2</sup> et de deux appartements type T5 d'une superficie de 94 m<sup>2</sup>. Il comprend au total seize logements. La hauteur sous plafond est de 2,7 m. La surface totale chauffée est de 960 m<sup>2</sup>. Les grandes façades sont orientées Est-Ouest et possèdent des surfaces vitrées importantes de 30 % et 20 % respectivement.. La surface vitrée des façades Nord et Sud ne représente que 5%.



Figure 4-1 : Vue aérienne et latérale du bâtiment étudié à La Rochelle.

### 4.2.2 Données météorologiques

La ville de La Rochelle bénéficie d'un climat océanique qui se caractérise par un hiver doux et un été avec des températures tempérées par la brise de mer. Provoquée par le réchauffement rapide du sol en cours de journée, tandis que la température de la mer reste constante, cette brise de mer se traduit par un vent parfois soutenu qui souffle de la mer vers la terre l'après-midi. La Figure 4-2 présente la température annuelle extérieure à La Rochelle.

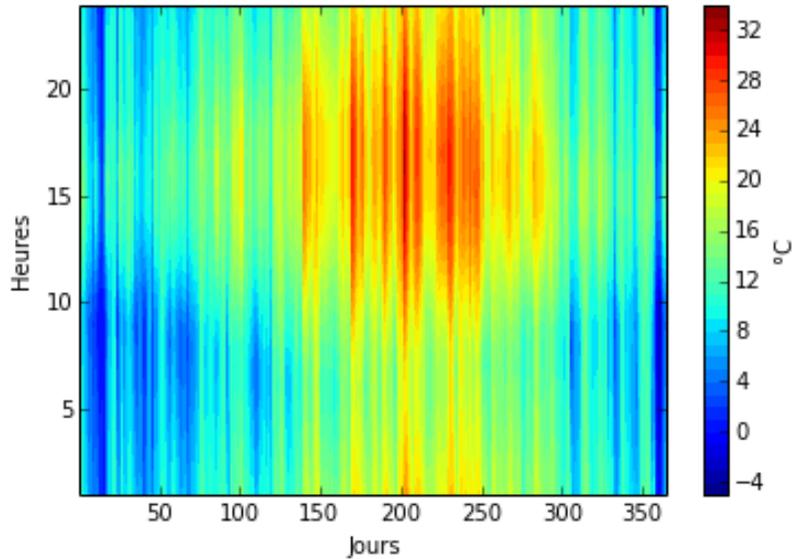


Figure 4-2 : La température annuelle extérieure à La Rochelle.

Les degrés-heures de chauffage de base 19°C sont de l'ordre 57 386 °C.h. Les degrés heures de rafraîchissement pour une base intérieure de 26°C sont de 176,55 °C.h.

La Rochelle est considérée comme la ville la plus ensoleillée sur le Sud-Ouest de la France avec un taux d'ensoleillement de l'ordre de 2 400 heures. L'irradiation solaire sur un plan horizontal à La Rochelle peut atteindre jusqu'à 947 W/m<sup>2</sup> (Figure 4-3).

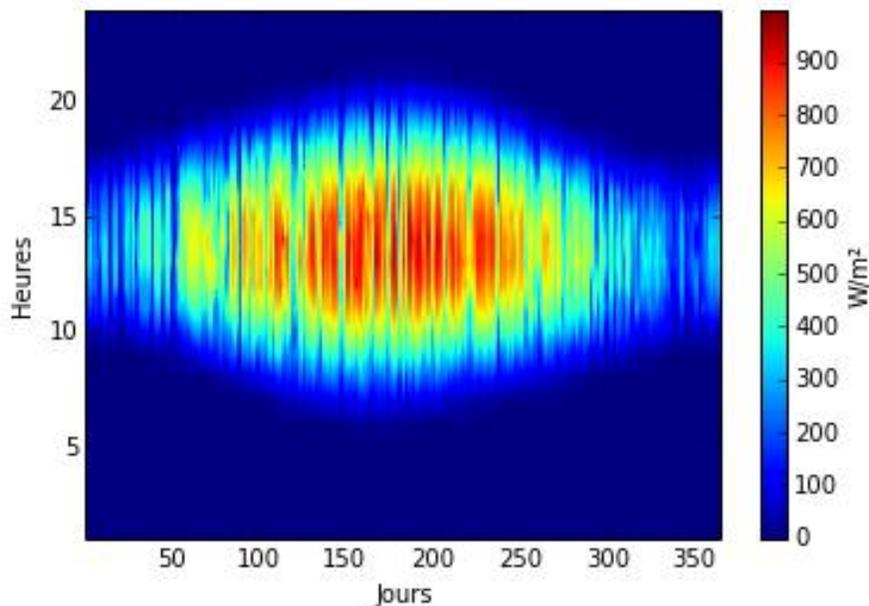


Figure 4-3 : Irradiation solaire globale annuelle sur un plan horizontal à La Rochelle

### 4.2.3 Le diagnostic de l'enveloppe et des systèmes

Un diagnostic détaillé du bâtiment a été réalisé. La structure du bâtiment est en moellon, et de type traditionnel, élevée sur cave. Le Tableau 4-1 présente les éléments constitutifs de l'enveloppe. Le bâtiment est ventilé naturellement via des entrées d'air en façade et des conduits collectifs. Le débit de ventilation pour la cuisine et la salle de bain est  $1 \text{ m}^3$  et  $14 \text{ m}^3$  par heure respectivement. Le test de perméabilité à l'air réalisé sur ce bâtiment a permis de fournir les résultats suivants :

- Pour un T5 : la perméabilité à l'air est de  $1,52 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$  sous 4Pa.
- Pour un T1 : la perméabilité à l'air est de  $0,66 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$  sous 4Pa.

Le bâtiment a été récemment raccordé au réseau de chaleur urbain qui couvre 100% des besoins de chauffage de la résidence. Il ne sera donc pas proposé de solution pour la modification du système de production de chaleur.

Une température de  $20^\circ\text{C}$  est assurée pour le confort thermique en hiver entre 6h et 23h pendant toute la semaine. Durant la nuit, cette température est réduite à  $17^\circ\text{C}$ . La production d'eau chaude sanitaire est réalisée dans chaque logement par un chauffe-bain au gaz naturel. Le rendement de ce système est de 86,9% (Tipee, 2014). L'éclairage des logements est assuré par des spots, des lampes basses consommations, des lampes incandescentes et des tubes fluorescents pilotés manuellement.

D'après ce diagnostic, les points les plus critiques du bâtiment et qui doivent être améliorés sont listés ci-dessous :

- Les murs extérieurs ne sont pas isolés,
- Les murs donnant sur cage d'escalier ne sont pas isolés,
- Les caractéristiques des fenêtres orientées Est sont médiocres,
- Les ouvrants sont vétustes et non étanches à l'air,
- Les combles sont faiblement isolés,
- Le plancher bas est non isolé,
- Le système de ventilation est peu efficace.

Tableau 4-1 : Description des éléments existants de l'enveloppe.

Elément de l'enveloppe	Composition	U existant	Photographie
Murs extérieurs	Mur moellon non isolé	1,83 W/m <sup>2</sup> .K	
Fenêtres	Menuiserie bois simple et vitrage avec persiennes pliables (façade Est)	4,5 W/m <sup>2</sup> .K	
	Menuiserie en PVC double vitrage 4/16/4 avec persiennes pliables (façade Ouest, Nord, et Sud)	1,6 W/m <sup>2</sup> .K	
Plancher bas sur cave	Plancher bas sur cave non isolée (hourdis brique)	1,34 W/m <sup>2</sup> .K	

Combles	Combles avec 12 cm de laine de roche	0,33 W/m <sup>2</sup> .K	
---------	--------------------------------------	--------------------------	--

La consommation d'énergie finale totale (chauffage, eau chaude sanitaire, gaz de cuisine et électricité) est de 241 kWh/m<sup>2</sup>. La Figure 4-4 présente la répartition du bilan d'énergie finale par poste consommateur. Le chauffage représente la plus grande part d'environ 56% (135 kWh/m<sup>2</sup>.an). C'est ce poste qui nous intéresse pour réaliser une étude d'optimisation. Il représente un défi considérable pour une réhabilitation énergétique efficace.

Globalement, la consommation d'énergie primaire est 315 kWh/m<sup>2</sup>. La facture énergétique du bâtiment sur l'année est de 21€ (TTC)/m<sup>2</sup>. L'émission de CO<sub>2</sub> est de l'ordre de 43 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. L'étiquette énergie et climat de ce bâtiment est donnée dans la Figure 4-5.

■ Chauffage ■ Eau chaude sanitaire ■ Gaz cuisine ■ Electricité communs ■ Electricité logements

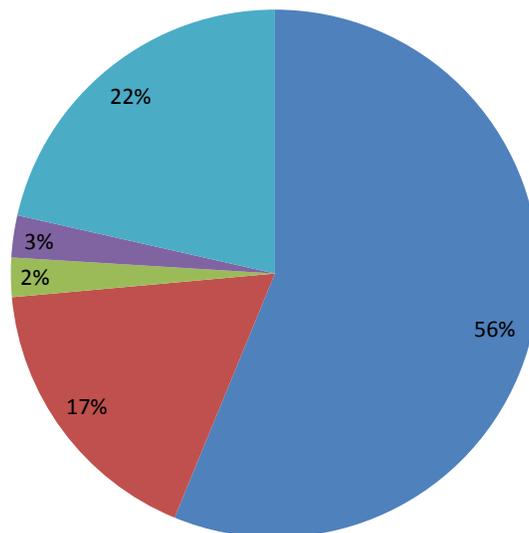


Figure 4-4 : Bilan énergétique par poste consommateur

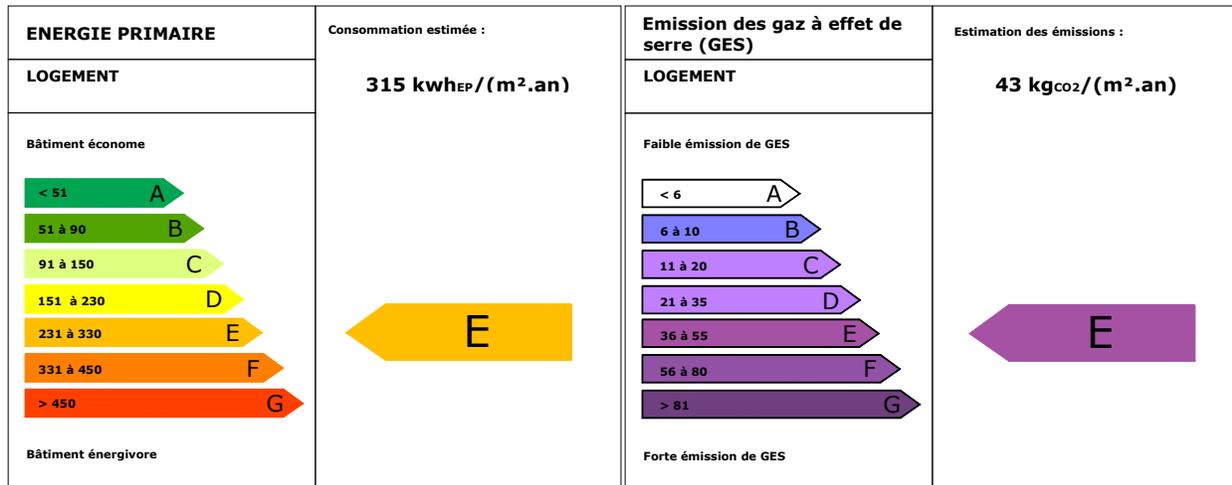


Figure 4-5 : Etiquette énergie (à gauche) et climat (à droite) après diagnostic de performance énergétique

### 4.3 Modélisation du bâtiment existant

Chaque étage du bâtiment est divisé en quatre zones thermiques (deux T1 et deux T5). Le comble et la cave sont considérés comme deux zones. La température de l'air est supposée uniforme dans chaque zone. On considère donc un nombre total de 18 zones thermiques. La géométrie du bâtiment a été saisie à l'aide du logiciel Google Sketchup et ensuite enregistrée à l'aide du plug-in Trnsys 3d (Figure 4-6).

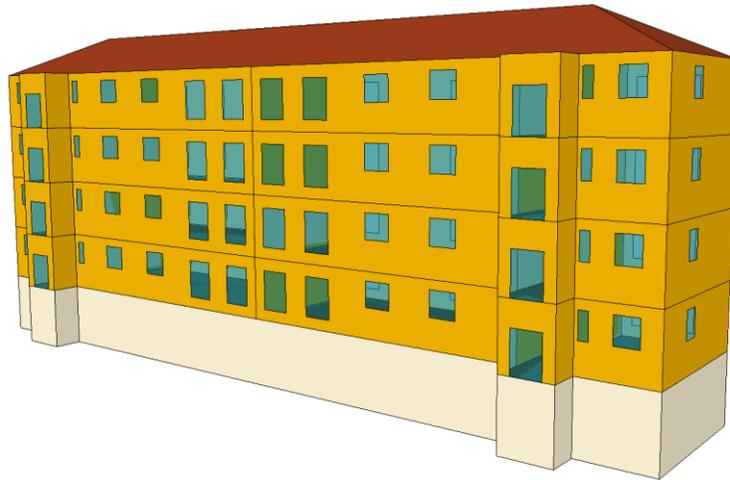


Figure 4-6 : Modélisation du bâtiment sous Trnsys 3d.

Les caractéristiques de l'enveloppe sont celles données dans le Tableau 4-2. La modélisation du transfert thermique à travers le sol est effectuée en se basant sur la norme NF EN ISO 13370 et le type 77 de Trnsys.

Un mode de gestion d'éclairage est utilisé. L'éclairage artificiel n'est allumé que lorsque l'éclairement est inférieur à 300 lux. Dans le cas contraire, l'éclairage naturel est suffisant. La puissance installée d'éclairage est de 5W/m<sup>2</sup>. Les autres appareils produisant des charges internes dans le bâtiment sont présentés dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Charges internes des appareils.

Type d'équipement	Puissance sensible moyenne	Horaire
TV	75 W	Du lundi au dimanche : de 13 h à 18 h et de 20 h à 22 h
Ordinateur	125 W	Du lundi au vendredi : de 20 h à 22 h Samedi et dimanche : de 14 h à 22 h
Réfrigérateur	125 W	En permanence

On considère que le bâtiment est occupé par 1 personne dans les logements de type T1 et par 3 personnes dans le cas des logements de type T5. Le scénario d'occupation en fonction de la chaleur totale (sensible et latente) dissipée par un occupant est présenté dans la Figure 4-7.

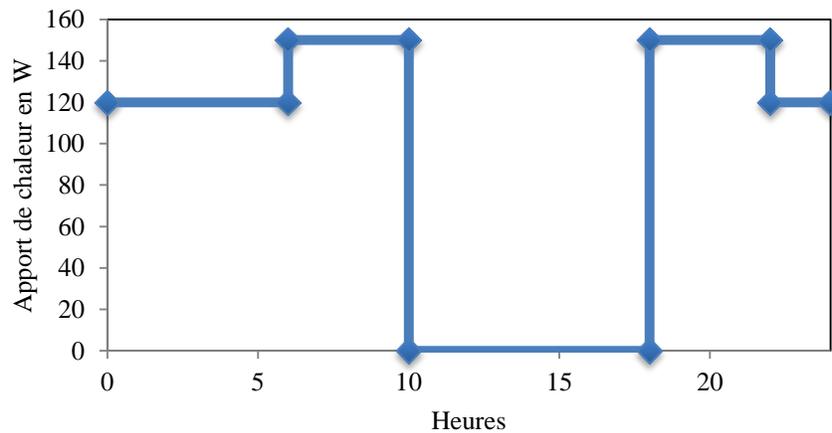


Figure 4-7 : Scénario d'occupation et apport de chaleur.

Les besoins de chauffage du bâtiment existant obtenus par la simulation thermique dynamique sont de 96 kWh/m<sup>2</sup>/an. Le taux d'inconfort le plus critique est 52% sur le logement de type T1 orienté Ouest au 4<sup>ème</sup> étage de l'immeuble.

#### 4.4 Définition des niveaux des paramètres d'étude

Les paramètres de conception choisis ainsi que leurs valeurs minimales et maximales pour le développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de chauffage sont présentés dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Les valeurs minimales et maximales retenues pour chaque paramètre d'étude.

Symbole	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)	Unité
$U_m$	0,15	1,83	W/m <sup>2</sup> .K
$\alpha_m$	0,1	0,9	-
$U_t$	0,15	0,33	W/m <sup>2</sup> .K
$\alpha_t$	0,1	0,9	-
$U_p$	0,15	1,34	W/m <sup>2</sup> .K
$\Psi_{pt}$	0,01	1	W/m.K
$U_{g-s}$	0,1	5,8	W/m <sup>2</sup> .K
$FS_{g-s}$	0,05	0,9	-
$U_{g-e}$	0,1	5,8	W/m <sup>2</sup> .K
$FS_{g-e}$	0,05	0,9	-
$U_{g-o}$	0,1	5,8	W/m <sup>2</sup> .K
$FS_{g-o}$	0,05	0,9	-
$U_{g-n}$	0,1	5,8	W/m <sup>2</sup> .K
$FS_{g-n}$	0,05	0,9	-
$U_f$	1,3	4,3	W/m <sup>2</sup> .K
$\alpha_f$	0,1	0,9	-
$q_{inf}$	0,11	T1 : 0,56 T5 : 0,49	v/h
$q_{vent}$	T1 : 0,125 T5 : 0,062	T1 : 1,25 T5 : 0,62	v/h
$q_{survent}$	0	5	v/h

Le niveau haut du coefficient de transmission des parois opaques correspond aux caractéristiques du bâtiment existant. Le niveau bas correspond aux spécifications techniques recommandées par des labels énergétiques que nous avons présentés dans le chapitre 1. L'épaisseur maximale de l'isolation dans les murs et le plancher bas est 25 cm, et de 15 cm pour la toiture (Il existe déjà 12 cm de laine de roche).

Le niveau haut du coefficient de transmission linéique des ponts thermiques correspond au cas où il n'y a pas de traitement spécifique de ces derniers. Ce coefficient est presque nul dans le cas contraire.

Les caractéristiques d'un simple vitrage sont définies comme niveau haut pour les coefficients de transmission thermique des ouvrants extérieurs et du facteur solaire. Le niveau bas est représenté par un vitrage à haute performance. Le coefficient de transmission du cadre varie d'un niveau

haut dans le cas d'un matériau de menuiserie en aluminium à un niveau bas qui correspond à un cadre en bois.

Les coefficients d'absorption solaire des surfaces extérieures opaques varient entre 0,1 et 0,9 selon le type de revêtement ou de la peinture utilisée.

Le niveau haut du taux de renouvellement d'air par infiltration correspond aux mesures effectuées sur le bâtiment existant. Le niveau bas correspond aux exigences des labels à savoir 0,6 v/h sous 50 Pa (0,11 v/h sous 4 Pa). Le débit de ventilation varie entre un débit assuré par une ventilation simple flux et une ventilation double flux avec un rendement de 0,9 afin d'assurer un débit hygiénique.

Le débit de renouvellement d'air lié à la sur-ventilation mécanique nocturne est nul pour le niveau bas, et il est égal à 5 v/h pour le niveau haut.

#### **4.5 Application de la méthode des plans d'expériences**

Si on effectuait une étude paramétrique simple variant chaque paramètre entre son niveau bas, sa valeur moyenne et son niveau haut, le nombre de simulations nécessaire serait de  $3^{19}$  soit (1 162 261 467). Le temps de calcul pour chaque simulation étant de 3 minutes, il faudrait 6633 ans de calcul ! Ce nombre colossal est évidemment impossible à mettre en œuvre.

Les plans d'expériences de type D-optimaux permettent de réduire drastiquement le nombre de simulations. Pour un modèle quadratique complet avec 19 paramètres, seulement 231 simulations sont nécessaires pour estimer la réponse et ensuite réaliser l'analyse de sensibilité ou l'étude paramétrique. Dans ce cas le temps total de simulation est de 11h et 55 minutes avec un seul processeur. Ce temps peut être réduit à 1h44 minutes si on utilise 8 processeurs (multiprocessing).

##### **4.5.1 Développement des modèles polynomiaux pour la prédiction des besoins de chauffage et du taux d'inconfort d'été**

Les besoins de chauffage ont été modélisés à l'aide du modèle quadratique complet. La saison de chauffage est considérée entre le premier Novembre et le premier Avril. La période de calcul du taux d'inconfort d'été s'entend du 15 mai au 15 Septembre. Pour la validation de ces modèles, cent simulations supplémentaires ont été effectuées pour chaque période. La combinaison des niveaux des paramètres étudiés est choisie d'une manière aléatoire.

La Figure 4-8 présente les résultats obtenus pour la comparaison entre les besoins de chauffage calculés par les simulations numériques et ceux prédits par le modèle quadratique complet.

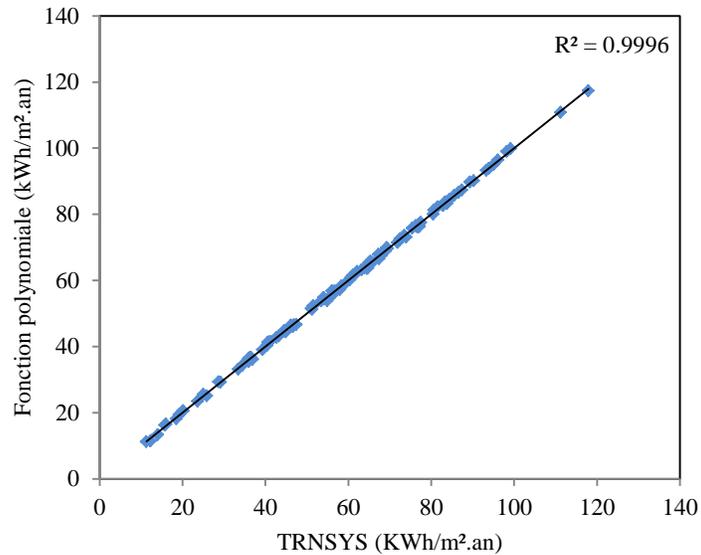


Figure 4-8 : Comparaison des résultats obtenus par les modèles polynomiaux et ceux des simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage.

Les résultats obtenus avec le modèle quadratique complet sont très encourageants. Le coefficient de régression est de 0,9996, l'écart maximal et moyen entre les simulations et le modèle polynomial est respectivement 0,98 kWh/m<sup>2</sup>.an et 0,38 kWh/m<sup>2</sup>.an, l'écart type est de l'ordre de 0,26 kWh/m<sup>2</sup>.an.

La Figure 4-9 présente une comparaison des résultats obtenus par la fonction polynomiale et ceux des simulations numériques pour la prédiction du taux d'inconfort d'été. On constate que les résultats obtenus sont satisfaisants. Les erreurs maximale et moyenne est respectivement de 7,66% et 2,49%, l'écart est de 1,63 %.

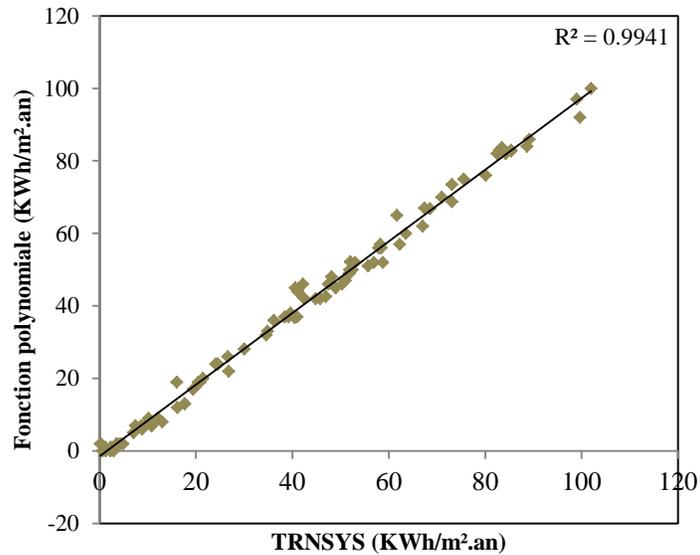


Figure 4-9 : Comparaison entre les résultats obtenus par les modèles polynomiaux et ceux des simulations numériques pour la prédiction du taux d'inconfort d'été pour le bâtiment étudié.

#### 4.5.2 Analyse de sensibilité des paramètres de conception sur les besoins de chauffage et le taux d'inconfort d'été

Après avoir validé notre modèle, nous procédons à une analyse de sensibilité des paramètres d'étude sur les besoins de chauffage (Figure 4-10) et sur le taux d'inconfort d'été (Figure 4-11).

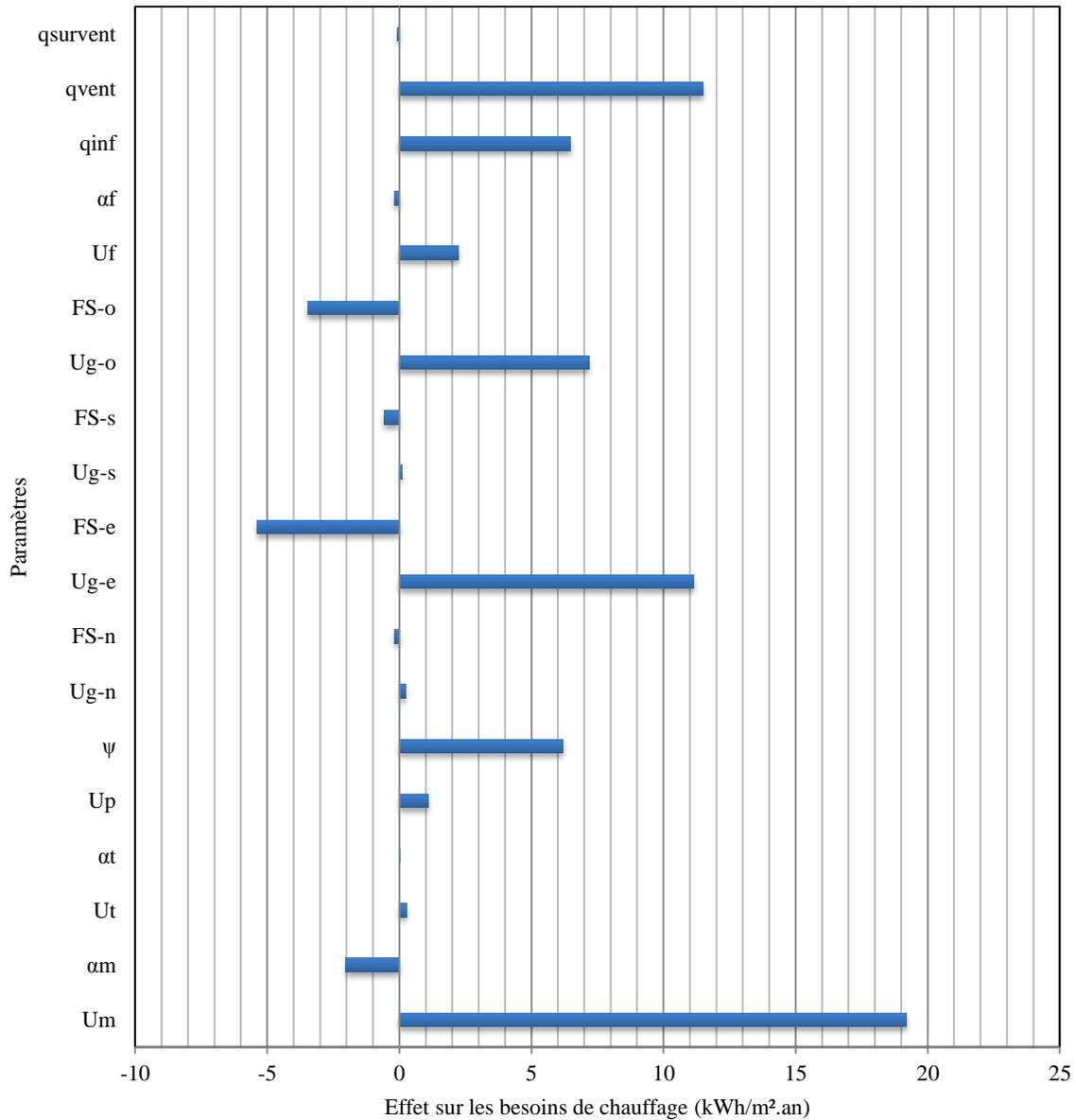


Figure 4-10 : Effet des paramètres sur les besoins de chauffage à La Rochelle.

Nous constatons que les paramètres les plus influents sur les besoins de chauffage sont :

- Le coefficient de transmission des murs extérieurs du fait de la grande surface déperditive qu'ils représentent,
- Le coefficient de transmission des vitrages Est et ouest car ils sont mal orientés et ils occupent une surface importante,
- Le coefficient de transmission linéique des ponts thermiques à cause du nombre d'intersections entre les éléments de l'enveloppe (Mur et plancher,...),
- Le taux de renouvellement d'air dû aux infiltrations d'air ou à la ventilation volontaire.

Des paramètres sont significatifs mais moins influents sur les besoins de chauffage comme le coefficient d'absorption des murs extérieurs, le coefficient de transmission du plancher bas et le coefficient de transmission des cadres des fenêtres. Les influences des autres paramètres peuvent être négligées pour une étude d'optimisation.

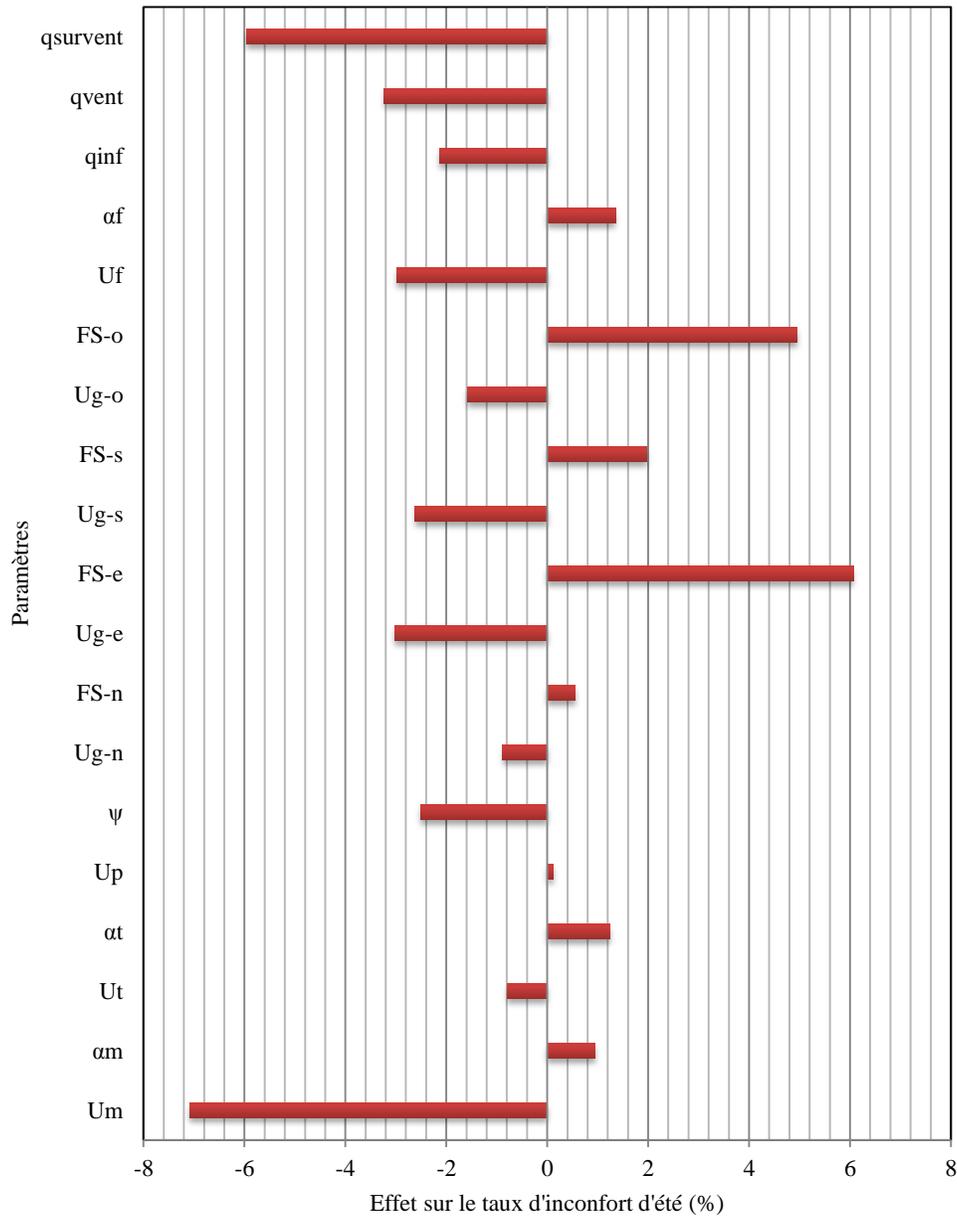


Figure 4-11 : Effet des paramètres sur le taux d'inconfort d'été à La Rochelle.

Concernent le classement des paramètres les plus influents sur le taux d'inconfort d'été, on trouve le coefficient de transmission des murs extérieurs, les facteurs solaires des fenêtres orientées Est et Ouest ainsi que le taux de renouvellement d'air dû aux infiltrations d'air et à

la ventilation mécanique. On voit apparaître naturellement en plus le taux de surventilation nocturne.

## 4.6 Détermination et analyse des solutions optimales

### 4.6.1 Introduction

Les modèles polynomiaux développés dans le chapitre précédent sont alors utilisés pour la réalisation d'une étude d'optimisation multicritère permettant de trouver des solutions techniques performantes. Les critères retenus pour la réhabilitation du bâtiment existant peuvent être classés en trois groupes :

Des critères de performance énergétique :

- Besoins de chauffage ;
- Taux d'inconfort d'été ;

Des critères économiques :

- Surcoût d'investissement ;
- Coût global sur le cycle de vie ;
- Temps de retour sur investissement ;

Des critères environnementaux :

- Epuisement des ressources ;
- Changement climatique ;
- Pollution de l'air ;
- Pollution de l'eau ;
- Energie primaire ;
- Energie procédé ;
- Consommation d'eau totale.

Les paramètres ci-dessous ont été négligeables dans les études de sensibilités précédentes et qui sont considérés fixes pour l'étude d'optimisation :

- Le coefficient d'absorption solaire des murs extérieurs égal à 0,3 ;
- Le coefficient d'absorption solaire de la toiture égal à 0,51 ;
- L'isolation de la toiture est de 12 cm (état existant) ;
- Le coefficient d'absorption solaire des cadres égal à 0,3 ;
- Les ponts thermiques sont supposés réduits de 50 % ;
- Le taux d'infiltration d'air correspond aux valeurs mesurées du bâtiment existant.

Les Tableau 4-6, Tableau 4-6 et Tableau 4-6 présentent les solutions techniques sélectionnées pour l'étude d'optimisation multicritère, les prix associés et les impacts environnementaux sur le cycle de vie. Vu le manque de données concernant les fiches FDES (données environnementales),

nous nous sommes limités seulement à certaines configurations. Une étude paramétrique complète est réalisée en utilisant les modèles polynomiaux de prédiction des besoins de chauffage et du taux d'inconfort d'été. Le nombre des combinaisons est 168. Si on considère 3 minutes par simulation à l'aide du logiciel Trnsys, le temps du calcul est de 8h 40 minutes. En utilisant les modèles polynomiaux, 500 combinaisons par seconde peuvent être simulées. Cependant, le temps de calcul est de l'ordre d'une seconde pour la détermination des solutions optimales.

Tableau 4-4 : Les impacts environnementaux, les surcoûts d'investissement et d'entretien en fonction de l'épaisseur d'isolation des murs extérieurs par la laine de roche.

<b>Critères</b>	<b>4 cm</b>	<b>8 cm</b>	<b>12 cm</b>	<b>16 cm</b>	<b>20 cm</b>	<b>24 cm</b>	<b>25,5 cm</b>
Epuisement des ressources (Kg Sb eq.)	19	43	68	93	117	142	154
Changement climatique (Kg CO <sub>2</sub> eq.)	2533	6123	9712	13302	16892	20481	22276
Pollution de l'air (m <sup>3</sup> )	437384	1116085	1794786	2473487	3152188	3830888	4170239
Pollution de l'eau (m <sup>3</sup> )	338	739	1140	1541	1943	2344	2544
Energie primaire (MJ)	39968	93057	146146	199236	252325	305415	331960
Energie procédé (MJ)	36687	86760	136833	186906	236979	287052	312089
Consommation d'eau totale (l)	6221	15421	24621	33822	43022	52222	56822
Surcoût d'investissement (€)	30432	36076	41664	47300	52935	58571	61389
Surcoût d'entretien (€)	11877	14064	16232	18419	20606	22793	23886

Tableau 4-5 : Les impacts environnementaux, les surcoûts d'investissement et d'entretien des différentes fenêtres.

Critères	VTR1 : Double vitrage 4/16 argon/4 (Ug=2,6, FS=0,77, Uf=3,46)	VTR 2 : Triple vitrage 4/10 argon/4/16argon/couche faible émissivité (Ug=1,3, FS=0,65, Uf=1,72)
Epuisement des ressources (Kg Sb eq.)	100,50264	119,99008
Changement climatique (Kg CO <sub>2</sub> eq.)	15831	15021
Pollution de l'air (m <sup>3</sup> )	2364768	1764818
Pollution de l'eau (m <sup>3</sup> )	5255	14429
Energie primaire (MJ)	306544	376611
Energie procédé (MJ)	291217	306544
Consommation d'eau totale (l)	204289	370042,4
Surcoût d'investissement (€)	132446	117232
Surcoût d'entretien (€)	35830	6319

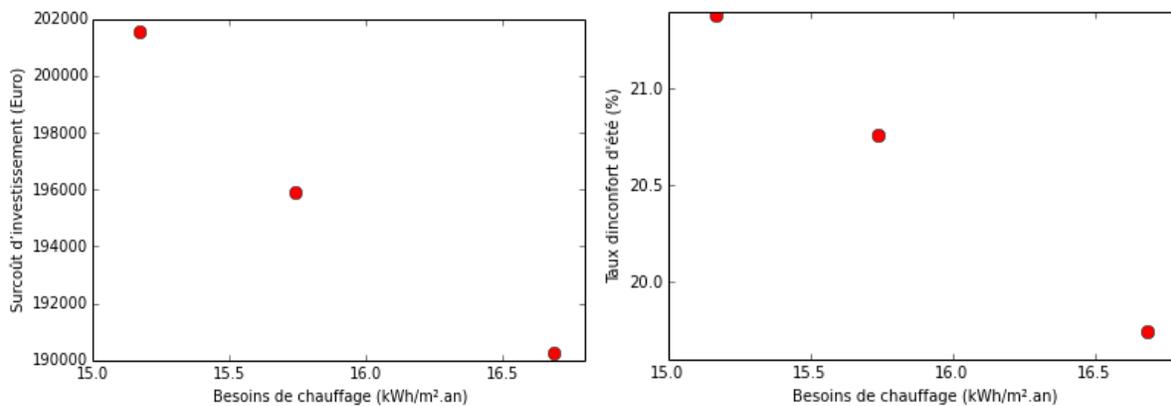
Tableau 4-6 : Les impacts environnementaux, les surcoûts d'investissement et d'entretien des systèmes de ventilation.

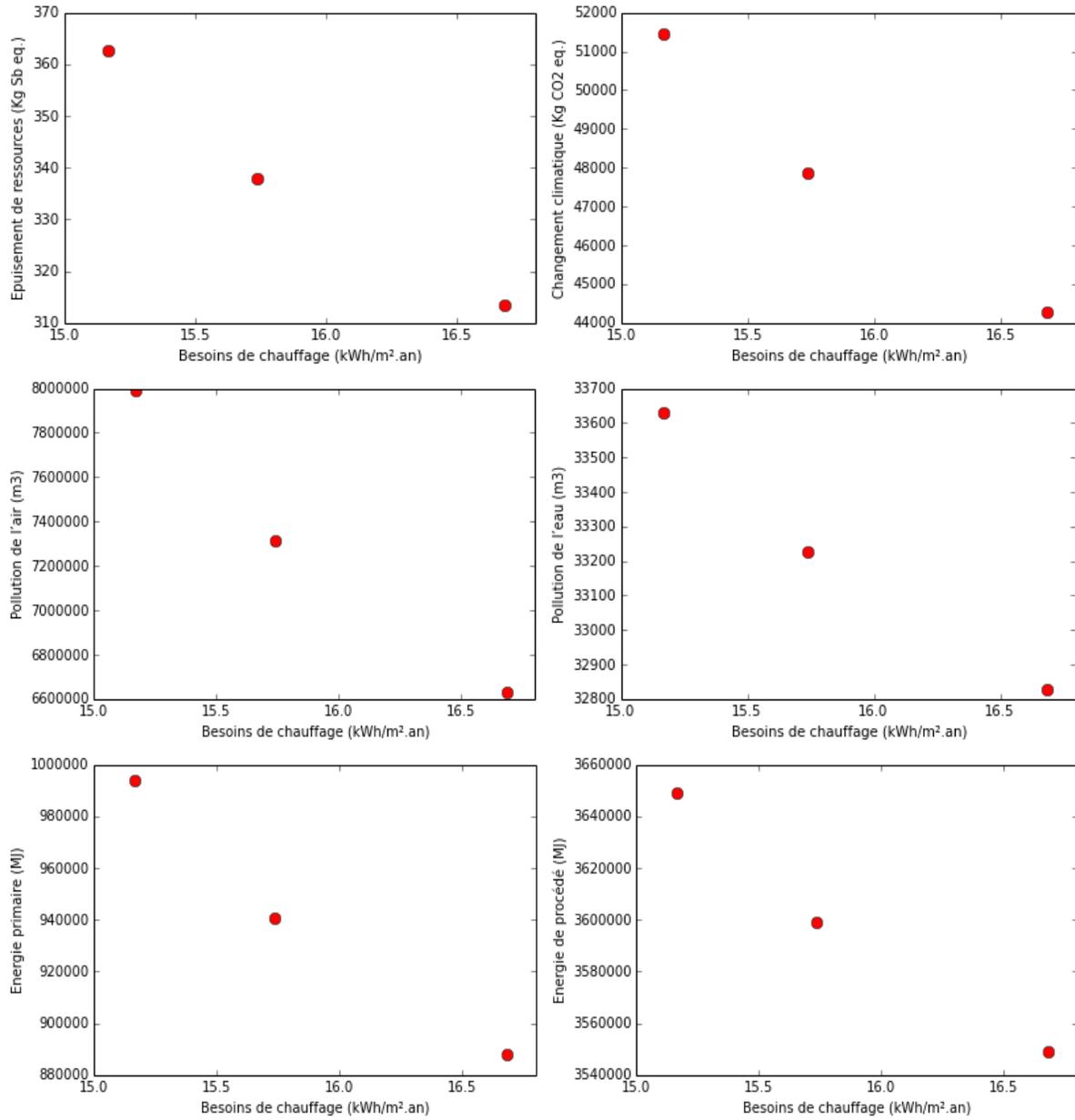
	Ventilation simple flux	Ventilation double flux	Surventilation 2,5 v/h	Surventilation 5 v/h
Epuisement des ressources (Kg Sb eq.)	0,000136	0,00064	0	0
Changement climatique (Kg CO <sub>2</sub> eq.)	35,49	122,65	0	0
Pollution de l'air (m <sup>3</sup> )	1470	29600	0	0
Pollution de l'eau (m <sup>3</sup> )	2230	11600	0	0
Energie primaire (MJ)	1780	5410	0	0

Energie procédé (MJ)	1700	5250	0	0
Consommation d'eau totale (l)	0,26	0,89	0	0
Surcoût d'investissement (€)	8000	16859	19	38,05
Surcoût d'entretien (€)	1056	4223	0	0

#### 4.6.2 Evaluation du compromis entre l'efficacité énergétique, les impacts économiques et les impacts environnementaux

Les résultats sont présentés dans cette partie sous la forme des fronts de solutions non dominées décrivant la surface de compromis permettant l'aide à la décision multicritère. La Figure 4-12 présente une projection 2D entre les besoins de chauffage et les autres critères.





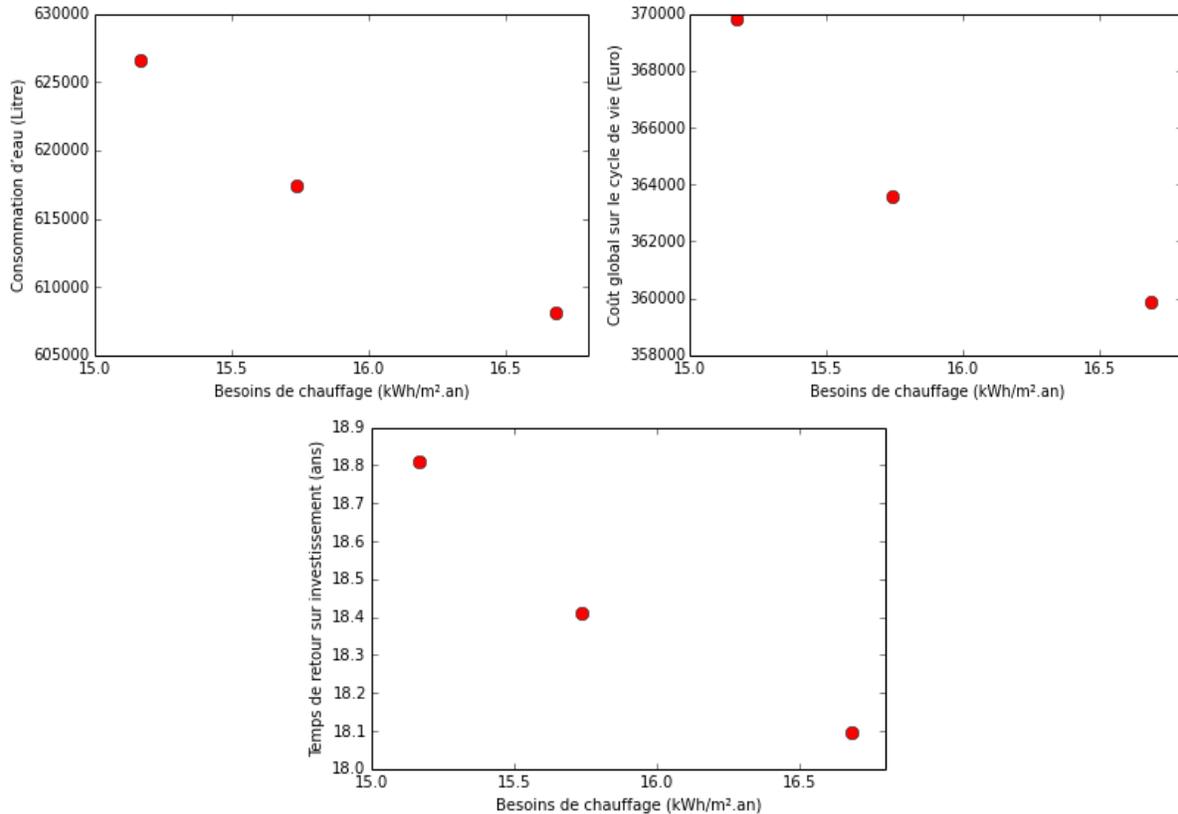


Figure 4-12 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, les impacts économiques et environnementaux pour La Rochelle.

Trois points optimaux ont été identifiés qui représentent un compromis entre les 14 critères étudiés. Nous retenons les solutions les plus proches du point idéal.

Les résultats montrent que les besoins de chauffage sont réduits d'environ 83,7% par rapport au cas de référence. Les besoins de chauffage sont égaux à 15 kWh/m².an. Le taux d'inconfort est aussi réduit à 20%, valeur inférieure à celle de référence.

Dans ce cas, le bâtiment considéré respecte les exigences réglementaires, et aussi celles des Labels MINERGIE-P et PASSIVHAUS. Les solutions techniques optimales sont alors :

- 20 cm de laine de roche pour l'isolation des murs extérieurs,
- Tripe vitrage à faible émissivité pour les fenêtrés orientées Est,
- Double vitrage pour les fenêtres orientées Ouest,
- Ventilation double flux avec un rendement de récupération de 0,9,
- Surventilation nocturne en été avec un taux de renouvellement d'air de 5 volumes par heure.

Le coût d'investissement engendré par la mise en œuvre de ces solutions est de 195916,46 euros. Ce qui se traduit par un ratio de 204 euros par m<sup>2</sup>. Le temps de retour sur investissement est d'environ 18 ans. Le coût global sur le cycle de vie du bâtiment est 363586,48 euros.

Pour les solutions optimales, l'impact environnemental global est également réduit de façon importante. Le tableau 4-7 présente les résultats obtenus.

Tableau 4-7 : Impacts environnementaux du bâtiment obtenus pour les solutions optimales.

Critères environnementaux	Valeur
Epuisement des ressources (Kg Sb eq.)	337,946304
Changement climatique (Kg CO <sub>2</sub> eq.)	47866,2228
Pollution de l'air (m <sup>3</sup> )	7311373,76
Pollution de l'eau (m <sup>3</sup> )	33227,47357
Energie primaire (MJ)	940891,0752
Energie procédé (MJ)	3598886,496
Consommation d'eau totale (L)	617355,0596

#### 4.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la recherche de solutions optimales pour l'aide à la décision lors de la réhabilitation d'un bâtiment existant situé à La Rochelle. Le but est de réduire les besoins de chauffage, tout en gardant le confort thermique d'été à un coût réduit et un impact environnemental limité.

Notre étude montre d'une part que le niveau de précision des modèles polynomiaux développés obtenu est très bon ; d'autre part, l'analyse de sensibilité réalisée via ces modèles a permis de négliger certains paramètres qui n'ont pas une influence significative sur les performances énergétiques.

Les résultats obtenus montrent que la réhabilitation à basse consommation énergétique est très faisable avec des solutions techniques simples. L'application de l'optimisation multicritère sur le bâtiment existant a permis de satisfaire la limite définie par les labels européens PASSIVHAUS et Minergie+ qui est de 15 kWh/m<sup>2</sup>.an en terme de besoins de chauffage. Les besoins de chauffage ont été réduits de 84,4%.

Nous avons montré sur cet exemple d'une opération de réhabilitation d'un bâtiment existant, que la méthode développée dans le chapitre 2 permet d'identifier, de manière rapide, des solutions optimales énergétiquement efficace et minimisant les impacts économiques et environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment.



## Conclusion générale et perspectives

Ce travail avait pour objectif principal le développement d'une nouvelle méthode rapide et efficace pour l'aide à la décision multicritère lors de la conception des bâtiments neufs ou la réhabilitation des bâtiments existants énergétiquement efficaces. En se basant sur des simulations numériques à l'aide de l'outil TRNSYS et la méthode des plans d'expériences, on a abouti avec succès au développement des modèles polynomiaux permettant la prédiction des performances énergétiques et du confort thermique adaptatif d'été. À partir de ces modèles, l'analyse de sensibilité a permis d'identifier les paramètres les plus influents sur les critères prédéfinis. Ceci nous a permis de réaliser une étude paramétrique et d'effectuer une recherche des solutions optimales dans une dimension multicritère et cela sur le cycle de vie du bâtiment avec moins de paramètres mais avec une précision acceptable, et surtout un temps de calcul drastiquement réduit. Cette méthode peut ainsi être un outil d'aide à la décision très efficace pour les concepteurs et les décideurs dans le domaine de la construction des bâtiments.

Dans un premier temps, un état de l'art des différents paramètres et les solutions techniques liées à la conception et la réhabilitation de l'enveloppe des bâtiments a mis en évidence les pistes sur lesquelles la réduction de la consommation énergétique peut être menée de manière efficace.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons réalisé une étude bibliographique sur les différentes méthodes d'optimisation existantes dans la littérature avec des analyses critiques permettant de déceler les avantages et les inconvénients de chacune d'elles. Cette analyse nous a révélé les contraintes majeures de telles méthodes, qui sont principalement le temps de calcul élevé ainsi que la difficulté de converger vers des optimums globaux du problème étudié. Ces contraintes empêchent une grande partie de concepteurs d'utiliser de telles approches dans le domaine de l'ingénierie. C'est pour cette raison que des solutions intuitives et qui ne sont pas optimales, vis-à-vis des critères prédéfinis, peuvent être malheureusement exécutées dans la phase de construction ou de réhabilitation des bâtiments. Afin de remédier à cette problématique, nous avons proposé une nouvelle méthode basée sur la méthode des plans d'expérience. Nous avons montré avec un cas d'étude simple l'efficacité de cette méthode. La précision des résultats obtenus est satisfaisante avec un temps de calcul très raisonnable.

La méthode développée a été ensuite appliquée pour un cas d'étude plus complexe (17 paramètres) dans le cadre de la conception des bâtiments neufs énergétiquement efficaces au Maroc. Pour évaluer la précision des résultats obtenus, quatre types de polynômes ont été étudiés à savoir le modèle linéaire, le modèle quadratique, le modèle quadratique avec interaction et le modèle quadratique complet. Ce dernier est le plus précis pour la prédiction des besoins de chauffage, des besoins de refroidissement, des besoins d'énergie finale et du confort thermique adaptatif d'été. Le nombre des simulations dans ce cas est 271. L'analyse de sensibilité réalisée nous a permis d'identifier les paramètres les plus influents sur ces critères pour chacune des six zones climatiques du Maroc. La détermination des surfaces de compromis entre les performances énergétiques et les impacts économiques nous a montré que dans les climats les plus froids

comme le cas de la ville d'Ifrane, des solutions techniques performantes telles que le double vitrage à faible émissivité et une isolation importante de l'ordre de 14 cm doivent être mises en œuvre. Par ailleurs, des solutions techniques simples telles que le simple vitrage, une épaisseur d'isolation de 2 cm pour les murs et 6 cm pour la toiture peuvent contribuer à des bâtiments à très faibles besoins énergétiques dans le cas de la zone d'Agadir.

Au chapitre quatre, la même démarche a été ensuite appliquée au cas de la réhabilitation d'un bâtiment existant à La Rochelle. Une fois de plus, les modèles polynomiaux permettant la prédiction des besoins de chauffage et du taux d'inconfort, nous ont fourni des résultats très satisfaisants. Une base de données économique et environnementale a été utilisée afin d'effectuer une étude d'optimisation multicritères. Les résultats nous montrent qu'il est possible de réaliser une réhabilitation durable à un coût raisonnable pour rendre le bâtiment considéré à basse consommation énergétique. Les besoins de chauffage ainsi obtenus sont de l'ordre de 15 kWh/m<sup>2</sup>.an, limite donnée par les labels Minergie-P et Passivhaus.

La méthode développée dans ce travail s'est avérée très avantageuse par rapport à celles qui existent dans la littérature, que ce soit pour la conception des bâtiments neufs ou la réhabilitation de ceux qui sont déjà construits. En outre, à l'aide de cette méthode, la recherche des solutions satisfaisant des exigences ou des contraintes spécifiques est réalisable aisément. Nous avons conclu aussi que des bâtiments à très basse consommation énergétique peuvent être obtenus à des coûts acceptables et avec un faible impact sur l'environnement.

Les paramètres du bâtiment choisis dans cette étude ne concernent que l'enveloppe et la ventilation mécanique. Dans cette étude nous avons considéré que les matériaux utilisés pour la conception des bâtiments neufs et pour la réhabilitation de l'existant correspondent aux cas réels de la construction. Cependant, l'utilisation d'autres types de matériaux est une piste intéressante pour la suite de ces travaux. Les matériaux à changement de phase par exemple peuvent être bénéfiques dans le cas du climat marocain pour améliorer l'inertie des parois extérieures. Il sera aussi primordial de développer une approche plus globale en introduisant des systèmes de production d'énergie. Pour rester sur une approche durable, l'intégration des énergies renouvelables, telles que les panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques, les puits climatiques, l'éolien interurbain, sera donc nécessaire et même la conception des bâtiments à énergie positive peut être envisagée.

Malgré les résultats encourageants que nous avons obtenus, la méthode que nous avons développée doit être utilisée avec précaution. Un test de validation des modèles polynomiaux par des échantillons aléatoires de simulation s'avère obligatoire pour pouvoir garantir la précision et la fiabilité des résultats. Par ailleurs, même si le temps de calcul en utilisant ces modèles est fortement réduit, de l'ordre de 300 configurations par seconde, lorsqu'on dépasse 10 000 000 de configurations, le temps de calcul devient élevé et il peut atteindre 9 heures.

L'application de cette méthode peut s'étendre à d'autres typologies de bâtiments et climats que ce soit pour le secteur résidentiel ou tertiaire. D'autres aspects peuvent aussi être étudiés tels que le confort visuel, acoustique, la qualité de l'air, la sécurité incendie, etc. Les exigences d'un label environnemental (BREAM, HQE, LEED...) peuvent être aussi évaluées.

Une nouvelle génération d'outils d'aide à la décision peut ainsi être développée. Il suffit d'avoir un plan d'expérience de type D-optimal avec un modèle quadratique complet et une base de données qui associe chaque paramètre de conception aux critères souhaités. Ce type d'outil peut être intégré ou couplé à des logiciels de simulation thermique dynamique ou de calcul réglementaire. Une interface conviviale pour les utilisateurs rendrait cette application très utile pour les concepteurs et les décideurs des projets de construction du bâtiment pour une aide à la décision rapide et multi-objectif.



## Annexe 1 : Les exigences limites réglementaire des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments résidentiels au Maroc

	TGBV	U toiture (W/m <sup>2</sup> .K)	U des murs (W/m <sup>2</sup> .K)	U vitrages (W/m <sup>2</sup> .K)	R minimale des planchers sous-sol (m <sup>2</sup> .K/W)	FS* vitrages
Z1	≤ 15%	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 5,80	NE	NE
	16-25%	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 5,80	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35%	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36-45%	≤ 0,65	≤ 1,20	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,3
Z2	≤ 15%	≤ 0,75	≤ 0,80	≤ 5,80	NE	NE
	16-25%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35%	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36-45%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,3
Z3	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 0,75	NE
	16-25%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 0,75	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35%	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 2,60	≥ 0,75	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36-45%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 1,90	≥ 0,75	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,5
Z4	≤ 15%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 3,30	≥ 1,25	NE
	16-25%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 3,30	≥ 1,25	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,25	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,6
	36-45%	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,25	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,5
Z5	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 1,00	NE
	16-25%	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	≥ 1,00	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,4
	36-45%	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,5 Autres : ≤ 0,3
Z6	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 1,00	NE
	16-25%	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	≥ 1,00	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,4
	36-45%	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,5 Autres : ≤ 0,3



## Annexe 2 : Matrices d'expériences

Annexe 2-1 : Plans D-optimaux pour 17 paramètres dans le cas du modèle linéaire (L18)

-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1
1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1
-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1
1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1
1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1
-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1

Annexe 2-2 : Plans D-optimaux pour 17 paramètres dans le cas du modèle quadratique (L35)

0	0	0	1	0	1	1	0	-1	0	1	0	0	1	0	-1	1
1	-1	0	0	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	0
0	-1	-1	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	1	-1	1	0	-1
0	0	-1	-1	1	1	-1	1	1	0	1	1	-1	-1	0	1	0
0	1	1	-1	1	0	-1	0	-1	0	1	-1	0	1	1	-1	-1
1	0	-1	-1	0	-1	1	-1	0	1	0	-1	-1	1	0	-1	-1
1	1	1	0	1	-1	1	1	-1	1	1	0	0	-1	1	1	1
0	-1	0	-1	-1	-1	0	0	-1	1	0	1	1	0	0	1	1
1	0	-1	1	1	0	-1	0	1	0	-1	0	1	0	-1	1	-1
0	1	-1	0	-1	0	-1	-1	1	-1	-1	1	0	1	0	1	1
-1	-1	0	-1	1	-1	1	-1	1	0	-1	1	0	-1	0	-1	-1
0	-1	1	-1	0	-1	0	-1	1	-1	-1	0	-1	1	1	1	0
-1	-1	-1	1	1	-1	-1	0	-1	-1	0	1	-1	1	0	0	0
-1	0	-1	0	-1	1	0	1	-1	-1	-1	-1	0	1	-1	1	0
0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	0	1	-1	1	0	-1	-1	0	0
-1	-1	1	-1	-1	0	1	1	0	0	0	1	-1	1	-1	1	1
0	1	-1	0	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0	-1	0	-1	-1	-1
-1	-1	-1	0	1	0	0	-1	0	1	1	0	0	0	0	-1	0
-1	1	0	0	0	1	-1	-1	-1	1	0	0	-1	-1	-1	1	-1

1	1	-1	-1	-1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
-1	1	0	0	0	-1	-1	0	0	0	1	-1	1	0	0	1	0
1	0	0	-1	0	0	-1	1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	-1
0	0	1	0	1	0	1	-1	-1	-1	0	-1	1	-1	0	-1	0
-1	0	0	1	-1	-1	0	-1	1	0	1	-1	-1	-1	1	0	1
0	-1	0	1	1	1	-1	1	0	-1	0	-1	0	0	1	-1	1
0	-1	-1	-1	0	0	1	0	1	1	1	-1	1	-1	-1	0	1
-1	0	1	0	0	-1	0	0	1	-1	0	1	0	0	-1	-1	1
1	-1	1	1	-1	1	0	0	0	-1	1	-1	-1	-1	0	1	-1
-1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	-1	0	1	1	0	0	-1
1	1	0	-1	1	1	0	-1	0	-1	1	1	1	1	-1	0	1
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	-1	1	-1	0	1	0	-1
-1	0	-1	1	0	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	0	1	1	-1
-1	0	-1	-1	-1	1	-1	0	0	-1	-1	0	1	-1	1	-1	1
1	1	-1	1	0	0	0	1	-1	0	-1	1	-1	-1	1	-1	0
1	-1	1	0	0	1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	0	0	1

Annexe 2-3 : Plans D-optimaux pour 17 paramètres dans le cas du modèle avec interaction (L154)

1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1
-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1
1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1
-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1
1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1
1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1
1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1
-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1
-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1



1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1
1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1
1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1
1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1
1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1
-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1
-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1
-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1
-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1
-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1
-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1
-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1

-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1
-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1
1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1
-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	1
1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1
1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1
1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1
-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1
-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1
-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1
-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1
1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1

Annexe 2-4 : Plans D-optimaux pour 17 paramètres dans le cas du modèle quadratique complet (L171)

-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
1	1	1	-1	-1	0	-1	-1	1	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	0	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
1	-1	-1	0	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1
0	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
1	-1	-1	0	1	0	-1	-1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0
1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
1	1	0	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
-1	0	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	0	1	0
1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	0	-1	1	1
-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	1	0	0	-1	0	-1	1	0	1
-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0	1	-1	-1	1	-1	1	-1
1	1	1	1	0	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1
1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	-1	-1	1	1	1
1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	1	-1
1	-1	-1	1	-1	-1	1	0	-1	1	0	-1	-1	1	-1	1	1
1	1	-1	-1	-1	1	-1	0	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0	1	-1
0	-1	-1	0	0	1	1	-1	-1	0	-1	1	-1	-1	1	0	0
1	1	1	1	-1	0	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	0	1	1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1
1	-1	-1	1	0	1	1	-1	0	-1	1	-1	1	-1	0	-1	1
-1	-1	1	-1	-1	1	-1	0	0	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0
0	1	-1	-1	0	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
-1	-1	-1	0	1	-1	1	-1	-1	1	0	-1	-1	0	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	0	1	-1	-1	1
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	0	1	0	-1	-1	0	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1
0	1	1	1	-1	1	0	1	-1	0	1	1	1	0	0	0	-1
-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
-1	-1	0	1	0	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	1
-1	-1	0	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1
-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

1	1	1	1	-1	-1	0	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	0	-1	0	-1	1	1	1	-1	1
-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	0	1	1	1	1	0
-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	0	0
1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	0	1	-1	1	1	1
1	0	0	-1	-1	1	-1	1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1
1	-1	1	1	1	1	-1	0	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1
-1	-1	-1	1	1	0	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	0
1	1	0	1	1	1	-1	1	0	1	1	-1	0	1	-1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
1	-1	-1	1	1	-1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	-1	1	1	1	1	0	0	-1	1	0	1	1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1
0	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	0	1	1	-1	1
1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
-1	1	0	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1
-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	0	1	-1	1
-1	1	1	-1	1	0	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0	-1	1	1	1	-1	1
1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0	-1	1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0	1	-1	-1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1	-1	1	0
-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1
-1	-1	0	-1	1	-1	1	0	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
0	0	1	0	1	-1	-1	0	1	1	-1	0	-1	0	1	-1	-1
-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	0	-1
-1	-1	1	0	-1	0	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1	0	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	-1	-1	1	1	-1	1
1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	1	1	-1
-1	1	1	1	1	-1	1	1	0	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	0	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1
1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	0	1	1	1	-1	1	-1	1
1	0	0	1	0	-1	-1	-1	0	0	-1	1	-1	1	-1	-1	0
-1	-1	-1	0	1	1	0	1	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	-1
1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	-1	1	0	0	-1	1	-1	1	-1	-1	0	-1	1	-1	1	1

1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0	-1	1	1	1	-1	-1
1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	0	1
-1	1	0	-1	-1	1	0	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1
-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1
1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1
1	-1	-1	1	1	0	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
-1	1	-1	-1	1	0	1	-1	1	-1	1	1	1	0	1	1	-1
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	1	0	-1	0	1	0	-1	-1	1	-1	0	0	0	0	1	0
1	1	0	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1
1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
-1	-1	-1	1	-1	0	1	0	0	1	-1	1	1	0	1	-1	-1
1	0	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
1	-1	1	0	-1	1	1	-1	0	1	1	1	0	-1	-1	1	-1
-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	0	1	-1	-1	1
-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1
-1	0	0	-1	-1	1	-1	0	1	0	1	-1	-1	1	0	1	1
-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0	-1	1
-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	0	1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	0	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
1	-1	-1	-1	1	0	1	1	-1	-1	1	0	-1	-1	-1	0	-1
1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0	1	1	-1	-1
0	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	0	-1	-1	1	-1	1	1
1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
1	1	-1	-1	1	-1	0	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1
0	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	0	-1	0	0	-1	1	1
1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
0	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1

1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
1	0	1	1	1	1	-1	-1	-1	0	-1	-1	1	-1	-1	1	1
1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	0	-1	1	-1	1
1	1	1	-1	0	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	0	1
1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1
0	0	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1
-1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1
0	-1	1	-1	-1	0	0	-1	-1	1	0	-1	-1	-1	1	1	-1
1	-1	0	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
-1	-1	1	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0	1	1	1
-1	0	1	1	-1	1	0	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0
-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	0
1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
0	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1
-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1
1	0	1	1	-1	0	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1
-1	-1	1	0	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	0	1	1	1
1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1
1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0	-1	0	-1
0	1	-1	1	1	1	1	-1	0	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1
1	-1	0	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0	1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	0	1	-1	1	1	-1	0
-1	-1	-1	1	1	1	0	-1	1	-1	-1	1	0	1	1	1	-1
-1	0	1	1	-1	0	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	0	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0	-1	-1
-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1
-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	0	-1	-1	1	0	-1
1	-1	1	-1	1	-1	1	0	1	1	1	1	1	0	-1	-1	1
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	0	1	1	-1	1	-1



### Annexe 3 : Coefficients des modèles polynomiaux

Annexe 3-1 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins de chauffage (L18)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	9.5371826	26.841798	36.194888	147.25007	26.757183	45.52607
a1	4.1061487	7.8845584	9.7549886	33.823551	8.0942676	13.866589
a2	-0.561705	-1.13908	-1.372058	-4.45263	-1.191489	-2.159138
a3	1.9408379	4.7659048	6.1482945	19.750438	4.8478627	8.1534568
a4	-2.611435	-2.417291	-2.475701	-9.020185	-2.814866	-5.475622
a5	-0.684548	-0.414147	-0.388124	0.3172166	-0.587774	-1.130483
a6	1.7143163	2.9725889	3.6835069	12.31979	3.1028802	5.1972096
a7	1.2106208	2.3461014	2.971406	9.9102604	2.4181726	3.9067116
a8	-1.217979	-1.576616	-1.808617	-7.438712	-1.725034	-3.520362
a9	1.0049367	2.1850959	2.7906528	9.9628601	2.2169568	3.8510257
a10	-3.184732	-4.520308	-5.061741	-10.84283	-4.772111	-8.443619
a11	0.9679792	1.9443847	2.4401411	7.7876404	1.9878612	3.327832
a12	-2.143035	-2.24232	-2.343629	-8.457947	-2.458259	-4.757638
a13	0.5502436	0.3875921	0.3571151	0.8465145	0.3467739	0.6055436
a14	0.6143798	0.4229848	0.3498029	0.794374	0.5131426	1.0671911
a15	4.1328711	7.4923882	9.2427581	32.645691	7.740868	13.328579
a16	1.2250657	2.1961887	2.7410862	10.110122	2.2285218	3.7894412
a17	0.3311696	0.3424809	0.3565247	9.4874976	0.3826253	1.0872078

Annexe 3-2 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins de chauffage (L35)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	7.3810478	23.83366	32.79193	80.001519	23.465877	39.088698
a1	3.2488162	7.2696635	9.2453585	18.047066	7.390964	12.279291
a2	-1.798897	-2.314595	-2.548933	-3.048709	-2.51235	-4.399683
a3	3.4978594	5.8396784	7.0074137	12.26047	5.9998427	10.100828
a4	-0.774628	-1.239907	-1.501029	-1.975478	-1.425813	-2.557268
a5	-0.369355	-0.37976	-0.411809	-0.238484	-0.456294	-0.69151
a6	1.5774216	3.0217597	3.7782969	7.1117089	3.1005929	5.0103001
a7	0.7501226	1.9269568	2.5741369	5.1693941	1.9880179	3.3211484
a8	-2.043798	-2.676202	-2.957585	-3.747036	-2.883183	-5.268227
a9	1.0804242	2.3765807	3.0632272	5.7805198	2.4485281	4.1144869
a10	-4.080625	-5.759106	-6.470474	-8.233005	-6.13659	-10.77632
a11	1.2465706	2.5735135	3.2168816	5.7617169	2.6631247	4.2572965
a12	-2.235111	-3.045721	-3.419002	-4.219073	-3.278127	-5.96246
a13	0.2786784	0.9024961	1.1740808	2.1585582	0.907641	1.3892503
a14	-0.179371	0.0042369	0.1170226	0.2811203	0.0418504	0.1213085
a15	3.3575522	6.8047223	8.5777924	16.280997	6.9751133	11.579277
a16	1.3544428	2.5345775	3.1307563	5.7039827	2.5997649	4.2775691

a17	-0.7406	-0.633005	-0.603571	-0.58961	-0.69709	-1.206687
a1_1	-0.68741	-0.486381	-0.383001	-0.299645	-0.464981	-1.008627
a2_2	0.3827563	-0.16229	-0.380752	-1.02944	-0.099758	0.0405297
a3_3	-0.371888	-0.52369	-0.591954	-0.648196	-0.575364	-0.899832
a4_4	0.5838861	0.0817118	-0.132594	-0.213802	0.0521527	0.361834
a5_5	-0.428356	-0.244678	-0.181167	0.1035331	-0.271852	-0.745192
a6_6	-0.465424	-0.459083	-0.479903	-0.624764	-0.518704	-0.930747
a7_7	-0.074914	0.1392778	0.2151279	0.3188356	0.1521695	0.146443
a8_8	0.6070903	0.7290949	0.7296017	1.0211864	0.7240276	1.2978868
a9_9	0.4867778	0.6922545	0.8250768	0.9703918	0.8059254	1.5702234
a10_10	1.2328413	0.8230258	0.6578501	0.3496209	0.895489	1.777011
a11_11	0.0910066	0.1481268	0.195459	0.4893604	0.160448	0.478651
a12_12	-0.122335	0.2028601	0.3139471	0.3624128	0.2193183	0.4764843
a13_13	0.9371897	1.0147715	1.0834832	1.1778341	1.1123941	2.165555
a14_14	-0.23514	-0.284896	-0.324663	-0.606718	-0.296136	-0.542912
a15_15	0.4648096	0.4845581	0.5077998	0.4626881	0.54375	1.0870632
a16_16	0.7767206	1.0527206	1.1671382	1.6774152	1.076999	1.8834005
a17_17	-1.124152	-0.388877	-0.078305	0.6535298	-0.444252	-0.906885

Annexe 3-3 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins de chauffage (L154)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	9.9401464	27.028973	36.259886	84.177677	26.954647	45.879775
a1	3.3823737	7.4425678	9.4409456	18.369714	7.5959348	12.740731
a2	-1.552897	-2.067713	-2.291925	-2.829014	-2.209585	-3.91945
a3	2.3701703	4.9068594	6.1329098	11.365774	5.0019966	8.2273696
a4	-1.838927	-1.968926	-2.132096	-2.471573	-2.241367	-4.22296
a5	-0.138833	-0.017498	-0.020495	0.305023	-0.094791	-0.137737
a6	1.2451558	2.74518	3.5921243	7.2891463	2.8128925	4.775876
a7	1.0436614	2.2810361	2.946733	5.6853696	2.3499693	3.9801669
a8	-1.707662	-2.460305	-2.790674	-3.715352	-2.656458	-4.895824
a9	1.3462961	2.4325307	3.0417542	5.5621487	2.5194177	4.391682
a10	-3.667148	-5.376522	-6.097731	-8.038286	-5.681486	-9.998237
a11	1.342132	2.5352801	3.1515244	5.7224972	2.6052705	4.4200648
a12	-2.115369	-2.638579	-2.954402	-3.658949	-2.873011	-5.424213
a13	0.3272073	0.8333166	1.0997385	2.1940658	0.84832	1.4186214
a14	-0.335765	-0.408991	-0.446795	-0.500174	-0.452559	-0.884163
a15	3.0634814	6.4247268	8.145606	15.724317	6.5378292	10.9182
a16	1.0447808	2.2459146	2.8328026	5.3158187	2.2976293	3.7633715
a17	-0.180721	-0.093101	-0.072654	-0.001925	-0.113837	-0.203152
a1_2	-1.375409	-1.665843	-1.80826	-2.164653	-1.799011	-3.286909
a1_3	0.1490217	0.052987	0.0067898	-0.182312	0.0809554	0.1270788
a1_4	-0.034785	-0.033184	-0.019804	0.0101131	-0.025402	-0.038858
a1_5	0.095692	0.1370055	0.1146583	0.0310486	0.1260457	0.1563467

a1_6	-0.19074	-0.127073	-0.109851	-0.201655	-0.127684	-0.324864
a1_7	0.2444583	0.1405671	0.1104407	-0.046022	0.1648999	0.3397584
a1_8	-0.25304	-0.239387	-0.207899	-0.04199	-0.278144	-0.509742
a1_9	-0.071724	0.0380376	0.0462085	-0.089488	0.0498884	-0.033917
a1_10	-0.502088	-0.298281	-0.194268	0.040759	-0.335756	-0.482703
a1_11	0.0684536	0.0049961	-0.016445	-0.14402	0.024102	0.0809246
a1_12	-0.229096	-0.1861	-0.159009	0.007572	-0.228464	-0.476395
a1_13	0.1006523	0.0449674	0.0226655	-0.033233	0.0488734	0.1263706
a1_14	0.0117809	0.1340062	0.1588895	0.0626508	0.157231	0.25956
a1_15	0.2967035	0.2935578	0.2795947	0.1275943	0.3320793	0.5768296
a1_16	0.2998047	0.2660972	0.2182497	0.0742606	0.2882987	0.4445326
a1_17	0.0088055	0.0957384	0.0957602	0.0204038	0.109294	0.0799011
a2_3	0.0085147	0.0197	0.0243336	0.008845	0.0335738	0.0601237
a2_4	-0.120013	-0.123013	-0.103792	-0.03689	-0.135304	-0.16032
a2_5	-0.115184	-0.087956	-0.075984	-0.033485	-0.091	-0.203747
a2_6	-0.20675	-0.067513	-0.025794	0.0137221	-0.085175	-0.245419
a2_7	-0.144594	0.010993	0.0374988	0.0130066	0.0195583	-0.163305
a2_8	0.2302028	0.2511797	0.2481701	0.1064408	0.2853351	0.5996474
a2_9	-0.222579	-0.137351	-0.112584	-0.041573	-0.156531	-0.364921
a2_10	0.3980166	0.255173	0.1793936	0.058596	0.2706365	0.4191291
a2_11	-0.008914	0.0362559	0.0466587	0.0250178	0.0470714	0.0358573
a2_12	0.1345838	0.1176111	0.1052881	0.0373587	0.1296166	0.291011
a2_13	0.0529704	-0.009658	-0.015678	-0.006789	-0.010416	0.0914348
a2_14	-0.023553	-0.063299	-0.049436	0.0044485	-0.068499	0.0094816
a2_15	-0.113031	0.0373972	0.0826323	0.0337848	0.0624658	-0.018112
a2_16	0.0629489	0.0659863	0.0644682	0.0025045	0.0779827	0.1844044
a2_17	-0.207052	-0.273484	-0.267795	-0.080166	-0.315111	-0.513124
a3_4	-1.262857	-1.478709	-1.618646	-1.896591	-1.667773	-3.057689
a3_5	0.0268115	0.1495248	0.1550162	0.0524259	0.1526251	0.1884893
a3_6	-0.038155	-0.010443	-0.022798	-0.116084	-0.003206	-0.032508
a3_7	0.1461978	0.2790308	0.2771775	0.0355605	0.315217	0.3744031
a3_8	-0.146667	-0.185557	-0.167461	-0.019526	-0.192873	-0.30602
a3_9	0.2584734	0.115397	0.0512635	-0.034714	0.1318193	0.278875
a3_10	-0.478128	-0.242402	-0.156928	0.0138781	-0.264961	-0.523797
a3_11	-0.025495	-0.106105	-0.130469	-0.122534	-0.111858	-0.199141
a3_12	-0.31354	-0.211925	-0.182591	-0.047076	-0.248161	-0.554383
a3_13	0.0341675	0.1226695	0.136962	0.0273493	0.1494152	0.210753
a3_14	0.0340812	0.0613967	0.0842408	0.0516218	0.0751144	0.1472205
a3_15	0.2358429	0.1860538	0.1442854	0.0190399	0.2080776	0.3390337
a3_16	-0.058794	-0.021565	-0.009699	0.0146805	-0.028612	-0.102637
a3_17	-0.224057	-0.173484	-0.16637	-0.08512	-0.202736	-0.375632
a4_5	-0.119371	0.0184385	0.033466	0.0153362	0.0191124	-0.191552
a4_6	-0.159592	-0.050581	-0.020569	0.0061288	-0.059977	-0.234677
a4_7	-0.107741	-0.017876	0.005917	0.0328186	-0.02655	-0.152791
a4_8	0.1395632	0.0044593	-0.021788	-0.052302	0.010048	0.1931075

a4_9	-0.018628	0.0107108	0.0074837	-0.004231	0.0126806	-0.065044
a4_10	0.4154412	0.2337049	0.166805	-0.003885	0.2604664	0.5299301
a4_11	0.041105	0.0122713	0.0003079	-0.00277	0.009741	-0.028295
a4_12	0.2977912	0.0883452	0.0348637	-0.020543	0.1009569	0.461361
a4_13	-0.118669	-0.161338	-0.152904	-0.044896	-0.184042	-0.305546
a4_14	-0.035123	0.0403093	0.0688272	0.0589237	0.0419647	0.0831743
a4_15	-0.325395	-0.240622	-0.197713	-0.061092	-0.270908	-0.592622
a4_16	0.0135559	-0.027346	-0.029728	0.0033046	-0.03409	0.0113088
a4_17	0.10647	0.0722554	0.0614846	0.043668	0.0765715	0.177576
a5_6	-0.095148	0.0080308	0.0258102	-0.003902	0.0062053	-0.111906
a5_7	-0.223581	-0.197278	-0.169777	-0.063173	-0.237027	-0.288536
a5_8	0.1305699	0.1448518	0.1373606	0.0459698	0.1728598	0.2820938
a5_9	-0.060091	-0.119682	-0.122101	-0.048942	-0.139685	-0.153994
a5_10	0.0668131	-0.021672	-0.021494	-0.028085	0.0170043	0.0976093
a5_11	-0.226535	-0.166987	-0.149908	-0.072027	-0.196833	-0.405512
a5_12	0.05347	-0.045949	-0.065854	-0.033455	-0.036045	0.0083127
a5_13	-0.097455	-0.084753	-0.071974	-0.038959	-0.096188	-0.190019
a5_14	0.0514538	0.0060998	-0.010783	-0.013916	0.0094275	0.0514787
a5_15	-0.196439	-0.126678	-0.110233	-0.039411	-0.16059	-0.329949
a5_16	-0.02421	-0.111745	-0.135591	-0.056091	-0.143102	-0.150589
a5_17	0.0852317	-0.010111	-0.028943	-0.039887	0.002245	0.0804497
a6_7	0.1140571	0.0949697	0.0829238	-0.003429	0.1133822	0.2087969
a6_8	0.0577623	0.0218611	0.0132511	-0.013723	0.0343955	0.0377053
a6_9	-0.014608	-0.019308	-0.017544	-0.045183	-0.020433	-0.105711
a6_10	0.0440155	0.1158728	0.1381282	0.1295759	0.1326071	0.1842301
a6_11	-0.052227	-0.036288	-0.033898	-0.065198	-0.03947	-0.078494
a6_12	-0.048214	-0.021726	-0.011354	0.0378023	-0.024647	-0.141701
a6_13	0.0884317	0.1056229	0.1086283	0.0059894	0.1330913	0.2508977
a6_14	-0.00723	0.021285	0.0214065	0.0244468	0.0237244	0.0462345
a6_15	0.1635954	0.1302527	0.1178212	0.0472873	0.1510727	0.1992128
a6_16	0.1791843	0.1883948	0.1869378	0.0744363	0.2239717	0.3951921
a6_17	0.1288869	0.0104957	-0.017098	-0.02496	0.0214587	0.1534174
a7_8	-0.201945	-0.183758	-0.165948	-0.047731	-0.205817	-0.378221
a7_9	0.006407	0.017324	0.0121288	-0.01703	0.0166153	0.0298499
a7_10	-0.276272	-0.322807	-0.282009	-0.11208	-0.337353	-0.420501
a7_11	0.0426828	-0.040628	-0.05589	-0.044299	-0.041102	0.0138809
a7_12	-0.090225	-0.123281	-0.123154	-0.065141	-0.139665	-0.227117
a7_13	-0.201072	-0.500913	-0.598055	-0.833362	-0.526228	-0.767875
a7_14	-0.215034	-0.218122	-0.197683	-0.116469	-0.240733	-0.411092
a7_15	-0.105682	0.02793	0.0593784	0.045913	0.0373384	-0.073551
a7_16	0.0935464	0.1326254	0.1404111	0.0787118	0.1463959	0.2332624
a7_17	0.0842613	0.0826562	0.0773675	0.0201956	0.0828392	0.1603283
a8_9	-0.189052	-0.295148	-0.272353	-0.094104	-0.328712	-0.441245
a8_10	0.4950021	0.3580163	0.2939712	0.2240099	0.3749587	0.7289199
a8_11	-0.047167	-0.051267	-0.053258	-0.036283	-0.062525	-0.154793

a8_12	0.3822839	0.2052221	0.1441519	0.0332247	0.2310078	0.5448284
a8_13	0.1554686	0.1546132	0.1528772	0.0718165	0.1644183	0.2819133
a8_14	-0.076315	-0.096083	-0.102434	-0.043621	-0.115741	-0.171744
a8_15	-0.221721	-0.224614	-0.199404	-0.078256	-0.254436	-0.5059
a8_16	-0.093434	-0.05936	-0.05391	-0.044447	-0.05966	-0.205869
a8_17	0.0298588	-0.040388	-0.071835	-0.054691	-0.049042	-0.16388
a9_10	-0.06669	-0.088023	-0.071585	-0.006081	-0.096149	-0.076956
a9_11	-0.09057	-0.139176	-0.137862	-0.084328	-0.152241	-0.163917
a9_12	0.0036625	-0.046846	-0.060424	-0.025598	-0.061636	-0.160699
a9_13	-0.211912	-0.401661	-0.488174	-0.741914	-0.431393	-0.74021
a9_14	-0.033545	-0.083058	-0.109822	-0.146326	-0.089778	-0.167921
a9_15	0.0882573	0.1859368	0.2053121	0.1029698	0.2138405	0.3023766
a9_16	0.143885	0.0460525	0.0230388	0.0003557	0.0557161	0.1838019
a9_17	0.1028769	0.2362164	0.2535065	0.1094588	0.271814	0.3456542
a10_11	-0.270593	-0.086866	-0.043231	0.0033507	-0.095383	-0.378201
a10_12	0.8441384	0.5448411	0.4283862	0.2416077	0.59419	1.2200351
a10_13	-0.263203	-0.207993	-0.158216	-0.034618	-0.238833	-0.340552
a10_14	0.1295362	0.077487	0.0590837	0.0225491	0.0884994	0.1809465
a10_15	-0.628739	-0.514579	-0.416151	-0.203978	-0.533683	-0.894746
a10_16	-0.409299	-0.269164	-0.205008	-0.082128	-0.284498	-0.545572
a10_17	0.0305658	-0.003645	-0.009831	-0.030296	0.0044527	0.0360618
a11_12	-0.154047	-0.139228	-0.111658	-0.018836	-0.157794	-0.38407
a11_13	-0.214981	-0.392609	-0.475715	-0.763162	-0.427446	-0.71283
a11_14	-0.244867	-0.103379	-0.065944	-0.063631	-0.109197	-0.229701
a11_15	0.0857023	0.0070666	0.0055272	0.0090755	0.0197871	0.1216173
a11_16	0.1905325	0.1643437	0.1437999	0.034886	0.1964626	0.3299875
a11_17	-0.033668	-0.0461	-0.046377	0.0007417	-0.054127	-0.128225
a12_13	0.024367	-0.049523	-0.052657	-0.00138	-0.04933	-0.003647
a12_14	0.2551466	0.0510658	0.0160289	0.0015967	0.0527708	0.3261785
a12_15	-0.268926	-0.222634	-0.193236	-0.096639	-0.257991	-0.596347
a12_16	-0.295704	-0.320683	-0.288942	-0.096573	-0.361399	-0.559408
a12_17	0.0932951	0.1271459	0.1248526	0.0473967	0.1386587	0.1644612
a13_14	-0.310974	-0.14495	-0.101785	-0.07142	-0.165945	-0.428341
a13_15	-0.103488	-0.071171	-0.037896	-0.01222	-0.082847	-0.113748
a13_16	0.2422723	0.1764657	0.1572554	0.0475102	0.2207868	0.3863542
a13_17	-0.039666	-0.091951	-0.103933	-0.041421	-0.111643	-0.113821
a14_15	-0.118818	-0.205846	-0.189979	-0.067214	-0.219236	-0.128991
a14_16	-0.016235	-0.081838	-0.077008	-0.014809	-0.089218	-0.119179
a14_17	-0.054451	-0.113543	-0.118671	-0.058309	-0.118925	-0.124582
a15_16	0.3464893	0.3012481	0.2676927	0.095872	0.3394154	0.6122243
a15_17	-0.076557	0.0061715	0.0240411	0.0376883	0.0061985	-0.024781
a16_17	0.1668652	0.1668068	0.1320599	0.0527948	0.1727091	0.1705396

Annexe 3-4 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins de chauffage (L171)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	6.8343524	24.261386	33.544907	81.491783	23.831314	39.529776
a1	3.1053731	7.18503	9.1979754	18.254926	7.3017283	12.19634
a2	-1.682546	-2.112113	-2.304129	-2.760163	-2.271037	-4.047081
a3	2.1644551	4.6765383	5.908325	11.219154	4.7493888	7.8310226
a4	-1.530491	-1.778944	-1.978382	-2.418943	-2.025043	-3.79776
a5	-0.236469	-0.140754	-0.129723	0.2672461	-0.231681	-0.353546
a6	1.2447507	2.7169566	3.5420924	7.1879244	2.7756162	4.6351888
a7	0.7398526	2.1633999	2.8995869	5.70056	2.2292649	3.6594334
a8	-1.491378	-2.313193	-2.67888	-3.73104	-2.464901	-4.603791
a9	1.0452797	2.1597817	2.767282	5.3735379	2.2214115	3.7218267
a10	-3.592721	-5.44614	-6.205256	-8.115818	-5.753613	-10.00048
a11	1.3177668	2.5936794	3.2199251	5.7274866	2.6774776	4.4616416
a12	-1.848935	-2.593163	-2.97209	-3.698102	-2.82621	-5.227596
a13	0.4206802	0.7415058	0.9478737	2.0170914	0.7556918	1.315014
a14	-0.143482	-0.303226	-0.367945	-0.4986	-0.318068	-0.560903
a15	2.8907623	6.2861485	8.0317987	15.658038	6.3913635	10.653052
a16	1.1314099	2.2141745	2.7731793	5.2912119	2.2606149	3.7869116
a17	0.0871294	0.0276334	0.0091395	-0.012557	0.0345314	0.1395933
a1_2	-1.452937	-1.747494	-1.905835	-2.21604	-1.88798	-3.493537
a1_3	0.1429932	0.1140899	0.0898404	-0.107256	0.1386637	0.1407235
a1_4	-0.361481	-0.183511	-0.131295	-0.058013	-0.206253	-0.475296
a1_5	-0.086624	0.1138566	0.1594656	0.1037039	0.1057663	0.1092801
a1_6	0.1312203	0.0910946	0.0628804	-0.143103	0.1248064	0.1985131
a1_7	0.1388939	0.1813062	0.1951074	0.0241103	0.2163302	0.3635569
a1_8	-0.273465	-0.286158	-0.285447	-0.112648	-0.325041	-0.645145
a1_9	0.5019821	0.2921796	0.2129734	-0.044041	0.336726	0.6542242
a1_10	-0.794306	-0.433317	-0.287455	0.0004744	-0.493247	-0.934289
a1_11	0.1566465	0.0264589	-0.013907	-0.128575	0.0470564	0.1706661
a1_12	-0.222924	-0.122156	-0.083615	0.0222636	-0.145878	-0.40755
a1_13	0.0510476	0.056677	0.0500909	-0.064718	0.0739647	0.1290575
a1_14	-0.192881	0.0104625	0.0858589	0.1111922	0.0151868	-0.07126
a1_15	0.6310346	0.4614606	0.3775414	0.1527705	0.5189803	0.9181914
a1_16	0.1131837	0.1110412	0.0966799	0.0512252	0.1266443	0.1753725
a1_17	0.0557973	0.1135394	0.1384958	0.0783278	0.1280293	0.2189966
a2_3	0.0752957	0.0220429	0.0009165	-0.015475	0.0273378	0.0589289
a2_4	-0.09714	-0.005979	0.0475753	0.053562	0.0040664	0.0566618
a2_5	-0.01308	-0.053214	-0.060053	-0.02827	-0.054752	-0.051017
a2_6	-0.003281	0.0054188	0.0155805	-0.004917	0.0078899	0.0396953
a2_7	-0.196289	-0.105429	-0.072424	0.0049826	-0.12128	-0.269108
a2_8	0.2248419	0.092622	0.049806	0.0058462	0.1001336	0.3249295
a2_9	-0.004623	0.0610373	0.0810391	0.0492994	0.0685772	0.0515184
a2_10	0.4453577	0.3224603	0.2650704	0.0890292	0.3429372	0.5972815

a2_11	-0.021521	-0.185818	-0.233049	-0.160251	-0.204544	-0.265134
a2_12	0.0915369	0.0215099	0.0152219	0.0367822	0.0331251	0.1879794
a2_13	0.2547334	0.1111248	0.0532387	-0.01588	0.119834	0.2334927
a2_14	0.107852	0.0008108	-0.026271	-0.013438	-0.000631	0.0815774
a2_15	-0.078197	-0.022861	-0.012507	-0.028744	-0.027686	-0.139907
a2_16	-0.000109	-0.116528	-0.148645	-0.08913	-0.133273	-0.201898
a2_17	-0.229146	-0.190591	-0.167031	-0.081527	-0.214155	-0.363964
a3_4	-1.306424	-1.582274	-1.772562	-2.040699	-1.798711	-3.377732
a3_5	-0.350932	-0.035692	0.0565834	0.1296362	-0.065227	-0.275029
a3_6	0.1216548	0.1148588	0.0978058	-0.026635	0.1341487	0.2059913
a3_7	0.0935465	0.0956853	0.0926776	-0.002284	0.1066864	0.1752273
a3_8	-0.169969	-0.27094	-0.28173	-0.143889	-0.294061	-0.464284
a3_9	0.2931924	0.1190948	0.0548679	-0.045639	0.1355873	0.3207023
a3_10	-0.405967	-0.328247	-0.283651	-0.097791	-0.348563	-0.546178
a3_11	0.0339468	0.0118301	0.004374	-0.024413	0.0129709	-0.009187
a3_12	-0.101397	-0.174004	-0.189637	-0.071913	-0.193124	-0.293299
a3_13	0.0719268	0.1481867	0.1716486	0.0963066	0.1657688	0.2368754
a3_14	-0.022559	-0.034133	-0.04185	0.0031029	-0.045472	-0.068273
a3_15	0.0842029	0.0697146	0.0722305	0.038179	0.0784343	0.1558886
a3_16	0.0718281	0.1027642	0.1135764	0.0857451	0.1176323	0.2229052
a3_17	0.018172	0.0124865	0.0175785	0.0200657	0.0090633	0.0279138
a4_5	0.1631321	0.0001107	-0.043535	-0.061454	0.0146868	0.1197303
a4_6	0.306998	0.2395546	0.1983031	0.0692552	0.2666171	0.43738
a4_7	-0.111964	-0.021807	-0.001779	0.0006365	-0.027661	-0.085338
a4_8	0.1423528	-0.011665	-0.031209	-0.034063	0.002449	0.2035575
a4_9	-0.121305	-0.052084	-0.037598	-0.009135	-0.060349	-0.166343
a4_10	0.3700075	0.2082485	0.1524027	0.0312924	0.2241815	0.4775222
a4_11	-0.10331	-0.050913	-0.049304	-0.024721	-0.066486	-0.173263
a4_12	0.1158318	-0.018577	-0.04577	-0.028164	-0.019912	0.1897138
a4_13	0.1479848	0.0145963	-0.034509	-0.074652	0.0195782	0.0501503
a4_14	0.0166501	-0.127983	-0.17201	-0.110615	-0.145999	-0.204505
a4_15	-0.190479	-0.100521	-0.082476	-0.051142	-0.114996	-0.367218
a4_16	-0.250041	-0.216777	-0.191439	-0.085393	-0.242268	-0.444439
a4_17	0.0184852	-0.081708	-0.112354	-0.092737	-0.093409	-0.159326
a5_6	0.0411094	0.0469728	0.0414493	0.050625	0.0360702	0.0822078
a5_7	0.082639	0.1408334	0.1527272	0.0855453	0.1500253	0.2682366
a5_8	0.0600783	-0.081748	-0.11169	-0.062391	-0.081926	-0.08055
a5_9	0.0819556	0.0664731	0.0477977	0.0263335	0.0631449	0.1044844
a5_10	-0.003815	-0.103219	-0.10504	-0.049574	-0.082614	-0.097005
a5_11	-0.123507	-0.014129	0.0163453	0.0369056	-0.026889	-0.077271
a5_12	0.0450786	0.0071849	0.0003801	0.0209478	0.0196875	0.0621412
a5_13	0.0410163	0.108951	0.1090465	0.0752149	0.1120985	0.1058682
a5_14	0.0996049	0.1264907	0.1399147	0.1125666	0.1453227	0.2165281
a5_15	0.0927249	0.2360166	0.2527502	0.1626836	0.2350164	0.3118698
a5_16	0.0320447	0.1296732	0.1528398	0.1037857	0.1282638	0.216011

a5_17	-0.144799	-0.034597	0.012383	0.0513675	-0.044391	-0.120763
a6_7	0.0442697	0.0389329	0.0328987	-0.055258	0.0464655	0.06399
a6_8	0.0284874	-0.045519	-0.058004	-0.01912	-0.05144	0.0250822
a6_9	0.0650117	0.0964913	0.086165	-0.023462	0.1167198	0.1141814
a6_10	-0.15322	-0.046058	-0.011788	0.0471444	-0.057852	-0.161298
a6_11	0.1143231	0.0418597	0.0105799	-0.033776	0.0522879	0.1335532
a6_12	-0.080059	0.0054069	0.0484702	0.0460916	0.0113825	0.017065
a6_13	0.0574569	0.0746552	0.0742362	0.0080499	0.0880198	0.1154843
a6_14	0.1291289	0.2397927	0.2611901	0.1812391	0.2619181	0.3703591
a6_15	0.1707747	0.1375073	0.1208081	0.0309389	0.1656827	0.2448033
a6_16	-0.101274	0.0694604	0.1228375	0.1097665	0.0796786	0.0638827
a6_17	-0.079112	0.0011238	0.0263992	0.0567288	-0.002772	-0.0508
a7_8	-0.265533	-0.155507	-0.115893	0.0257509	-0.181206	-0.427438
a7_9	0.1287437	0.0336074	0.0146003	-0.060029	0.0517925	0.180252
a7_10	-0.315209	-0.192394	-0.134897	-0.012493	-0.205025	-0.419536
a7_11	0.1969597	0.1210246	0.1032503	0.0353765	0.1374251	0.2808498
a7_12	-0.094792	-0.120144	-0.130421	-0.097415	-0.131056	-0.289949
a7_13	-0.049481	-0.160822	-0.23316	-0.640699	-0.157931	-0.264173
a7_14	-0.128724	-0.135239	-0.136175	-0.119729	-0.145381	-0.292927
a7_15	0.2989201	0.3080954	0.3088931	0.1438685	0.3487649	0.6106644
a7_16	-0.007912	0.0432416	0.0498746	0.0186868	0.0411849	0.0115407
a7_17	-0.096126	-0.054424	-0.026855	0.0052961	-0.054398	-0.038194
a8_9	-0.047028	0.0104406	0.0326621	0.0532298	0.0102007	-0.021707
a8_10	0.543547	0.5426914	0.521417	0.381638	0.5861805	1.0795797
a8_11	-0.13094	-0.081368	-0.070104	-0.043122	-0.096884	-0.199632
a8_12	0.1774251	0.0892292	0.0749824	0.0368954	0.1039063	0.3374464
a8_13	-0.130011	-0.167377	-0.17592	-0.111838	-0.182029	-0.282975
a8_14	-0.00549	-0.004148	-0.000863	-0.002194	-0.003969	0.0284953
a8_15	-0.442792	-0.391143	-0.357604	-0.163643	-0.435934	-0.886953
a8_16	-0.118493	-0.152048	-0.146408	-0.065048	-0.165518	-0.260312
a8_17	0.0500335	-0.005071	-0.03174	-0.054763	-0.016083	-0.038311
a9_10	-0.207458	-0.180388	-0.156077	-0.076803	-0.198291	-0.347839
a9_11	0.1558551	0.0406196	0.0039503	-0.03843	0.0587844	0.1554412
a9_12	-0.077316	-0.152946	-0.165694	-0.072865	-0.173868	-0.304336
a9_13	-0.089321	-0.230702	-0.3076	-0.682535	-0.232431	-0.354398
a9_14	-0.054322	-0.120074	-0.145801	-0.14826	-0.128529	-0.206654
a9_15	0.1840401	0.0541355	0.0221997	-0.032671	0.0716732	0.2335347
a9_16	0.0371901	-0.094075	-0.129036	-0.093544	-0.102	-0.163264
a9_17	0.0120115	0.0840536	0.0883954	0.0654976	0.0885301	0.0223051
a10_11	-0.451512	-0.174294	-0.076105	0.0410512	-0.190226	-0.429869
a10_12	0.8404308	0.512766	0.3935653	0.2249312	0.557342	1.1984755
a10_13	-0.172853	-0.200315	-0.201301	-0.11221	-0.224037	-0.379
a10_14	0.2080888	0.0577472	-0.000976	0.007353	0.053859	0.1372882
a10_15	-0.619485	-0.458527	-0.357394	-0.19103	-0.478676	-0.87561
a10_16	-0.257373	-0.216292	-0.181515	-0.087183	-0.230561	-0.33874

a10_17	-0.100856	-0.116624	-0.116836	-0.049468	-0.134687	-0.211706
a11_12	-0.233166	-0.081235	-0.030879	0.0448849	-0.103607	-0.348865
a11_13	-0.372256	-0.334411	-0.35285	-0.648442	-0.345882	-0.653487
a11_14	0.0199464	0.0205743	0.0066724	-0.025091	0.0119008	-0.013097
a11_15	0.3467114	0.1669767	0.1013932	0.0016128	0.1909398	0.4069905
a11_16	0.1150379	0.0756263	0.0765471	0.0567769	0.0930844	0.2328519
a11_17	0.0375311	-0.079207	-0.092572	-0.060177	-0.081328	-0.034865
a12_13	-0.157054	0.051603	0.1244626	0.1389977	0.058751	-0.003552
a12_14	0.0405321	-0.011687	-0.039151	-0.034098	-0.023829	-0.009452
a12_15	-0.354226	-0.18473	-0.11067	-0.020206	-0.203968	-0.522685
a12_16	-0.039522	-0.00233	0.0142176	-0.010156	0.0004071	-0.041444
a12_17	0.0719179	0.0193345	-0.020391	-0.03183	0.0149309	-0.022651
a13_14	-0.075245	-0.002758	0.0268744	0.0124456	-0.000734	0.0144807
a13_15	0.1068059	0.0516819	0.0310591	-0.029787	0.0619247	0.0903981
a13_16	-0.086648	-0.004946	0.0184566	0.0460683	-0.00935	-0.070177
a13_17	-0.031683	0.041239	0.0570407	0.0336041	0.048778	0.0546041
a14_15	-0.067269	0.0713588	0.1187321	0.1003405	0.0756067	0.1227283
a14_16	-0.252893	-0.116495	-0.063932	0.0235856	-0.131858	-0.267544
a14_17	0.1141972	0.0373833	0.010687	-0.004995	0.0489953	0.0910909
a15_16	0.1563866	0.2009438	0.2085281	0.1142983	0.2279461	0.3564103
a15_17	-0.17604	-0.089637	-0.066457	-0.041567	-0.101469	-0.282938
a16_17	-0.225974	-0.162545	-0.142345	-0.097495	-0.176501	-0.348111
a1_1	0.8751616	0.3504093	0.16797	0.0915615	0.3816169	0.8718039
a2_2	0.1957387	0.3467579	0.3864164	0.1103765	0.3906652	0.68739
a3_3	0.6524383	0.2785099	0.1416219	-0.138283	0.3221995	0.7476895
a4_4	0.1378803	0.0433471	0.0299663	-0.033288	0.0721809	0.3480642
a5_5	-0.108385	0.2177395	0.2787507	0.2428046	0.2161942	0.3335336
a6_6	0.6659528	0.2728247	0.1321401	-0.068152	0.2999596	0.6473814
a7_7	-0.265641	0.1359788	0.2769407	0.3176017	0.1588485	0.1305087
a8_8	0.4957139	0.570344	0.6129277	0.8036444	0.6379629	1.2432566
a9_9	-0.146088	0.0147345	0.0826707	0.2392501	0.0149234	-0.007051
a10_10	0.8730452	0.6260117	0.5531516	0.7216623	0.6740862	1.3761043
a11_11	-0.007501	0.2388273	0.3332847	0.2804157	0.29073	0.4651229
a12_12	-0.067353	-0.287439	-0.327664	0.0065753	-0.305569	-0.107391
a13_13	-0.184168	-0.389894	-0.433698	-0.354519	-0.427908	-0.660001
a14_14	-0.413059	-0.021029	0.1847216	0.2496454	-0.000214	-0.043392
a15_15	0.2377418	0.1851081	0.1326004	0.0651142	0.2228913	0.239194
a16_16	0.4376094	0.270583	0.2049044	0.079106	0.2908061	0.4764743
a17_17	-0.269957	-0.074721	-0.037158	0.0818635	-0.10857	-0.434741

Annexe 3-5 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins de refroidissement (L18)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	6.7152856	14.132764	27.040726	5.3105038	35.367775	64.653867
a1	-0.214191	-0.280302	0.9327647	-0.407772	1.4471257	2.3180011
a2	0.6380999	0.9699069	1.21845	0.6281598	1.3465759	2.9720442
a3	-0.102138	0.4062545	1.3882323	-0.365023	2.0650438	2.6476107
a4	1.2480424	2.8203788	3.7483762	1.0773323	4.6260532	6.9914859
a5	0.3685763	0.5181816	0.4452382	0.023791	0.5245714	-0.082069
a6	-0.30547	-0.10349	0.6931835	-0.155618	1.0312492	2.4045319
a7	-1.10372	-1.271234	-0.557358	-1.207216	-0.262563	-0.906681
a8	2.7312251	4.5765279	5.0240863	2.6554167	5.3686914	8.7359146
a9	0.2813679	0.3521493	0.6895915	0.083485	0.8349123	0.6823378
a10	0.9962153	1.8818787	2.1896547	1.141045	2.2868588	5.2415194
a11	0.3346698	0.5716362	1.0887486	0.4426734	1.364305	2.7695109
a12	0.7787132	2.2508458	3.098896	0.5128645	3.9071295	5.8417802
a13	0.4963024	0.924945	1.2152478	0.2316935	1.4697977	2.3129326
a14	0.1668372	0.0964038	-0.152788	0.3468225	-0.271603	0.2598559
a15	-0.172454	-0.565331	0.5960682	0.0032417	0.8885206	1.7710361
a16	-0.187773	-0.036587	0.4835212	-0.342663	0.7191357	0.4453934
a17	-1.710633	-2.478512	-2.198901	-1.29609	-1.483424	1.9197062

Annexe 3-6 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins de refroidissement (L35)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	6.3604401	15.139509	28.958901	4.6168502	38.114606	70.062354
a1	-0.893352	-0.652736	1.1443502	-0.701445	2.0181785	3.3174733
a2	1.7131094	2.7603299	3.1328553	1.3603491	3.524463	5.8473323
a3	0.3759527	0.7482912	1.502522	0.2466571	2.02923	3.4668681
a4	1.2770672	2.4366628	2.7505262	1.0468824	3.2644728	5.4102423
a5	-0.115511	-0.206701	-0.353298	-0.174239	-0.366683	-0.541339
a6	0.1563818	0.3852043	1.1907953	0.1632988	1.5385593	2.4435017
a7	-0.211758	-0.135575	0.4269257	-0.07276	0.6440982	0.68745
a8	3.205241	5.5084206	6.0725052	2.7708335	6.5950632	10.655076
a9	-0.184692	-0.205657	0.2840366	-0.125481	0.4687204	0.2503481
a10	1.4602178	2.8827095	3.3695825	1.1533939	3.7340579	7.1030927
a11	-0.953927	-1.224909	-0.608423	-0.777244	-0.35832	-0.581726
a12	1.3481783	3.3231161	4.1970579	1.1091562	5.1863289	8.8731724
a13	-0.455357	-0.615242	-0.426461	-0.313767	-0.401746	-0.8544
a14	-0.211769	-0.418839	-0.494737	-0.145192	-0.622637	-1.150355
a15	-1.068984	-1.367587	0.3744034	-0.78967	1.008253	1.7370268
a16	-0.746418	-0.927944	-0.302951	-0.595321	-0.092219	0.1239985
a17	-1.785419	-2.399397	-1.700932	-1.484938	-0.809648	2.3718191
a1_1	-0.908435	-1.048087	-0.691918	-0.833671	-0.515386	-0.688963

a2_2	0.8945792	0.934796	0.544666	0.6904298	0.352893	0.6918932
a3_3	0.0835203	0.3141187	0.4043506	0.0920958	0.5940185	1.177151
a4_4	0.7870786	1.2453448	1.0972182	0.6034813	1.1951123	2.5263186
a5_5	0.196156	0.2368791	0.4190329	0.1556401	0.4921279	0.3816157
a6_6	0.6280219	0.9088077	0.977626	0.4697699	1.1271054	1.6593889
a7_7	-0.104267	-0.153425	-0.101408	-0.152386	-0.053212	-0.325732
a8_8	0.6522018	0.3867947	-0.024087	0.6543875	-0.417683	-0.779062
a9_9	0.2659762	-0.202435	-0.576655	0.1992204	-0.924784	-1.88065
a10_10	0.5711683	0.4578829	0.2602112	0.379627	0.314265	0.8232405
a11_11	0.4842965	0.4902777	0.2901016	0.4389667	0.1219649	-0.540981
a12_12	-0.722979	-0.845638	-0.986224	-0.530585	-1.001234	-1.397122
a13_13	0.9605599	0.5218838	-0.031803	0.8325245	-0.522081	-1.286548
a14_14	-0.327122	-0.311645	-0.176683	-0.338664	-0.042863	0.3910754
a15_15	-0.467734	-0.793413	-0.983598	-0.410664	-1.173195	-1.781972
a16_16	-1.285744	-1.611247	-1.512178	-0.981088	-1.53918	-2.156515
a17_17	-0.202331	-0.351995	0.0028916	-0.163881	-0.060854	-1.75961

Annexe 3-7 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins de refroidissement (L154)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	7.6993803	15.37614	32.764762	5.7632953	36.280636	66.591641
a1	-0.795012	-0.508146	0.1476418	-0.713417	1.9606817	2.722113
a2	1.2408089	2.1615629	3.215346	1.0099574	2.872452	4.7926656
a3	0.2438207	0.8376755	1.5860436	0.1525882	2.4856165	3.6730846
a4	1.2825248	2.4732599	3.5595518	1.1016048	3.6660384	5.796617
a5	-0.378851	-0.466193	-0.677004	-0.376015	-0.476346	-0.584764
a6	-0.19153	0.0496227	0.2943888	-0.190424	1.2127046	1.387547
a7	-0.919956	-0.980387	-1.19436	-0.764846	-0.164282	-0.891564
a8	3.2279176	5.3909144	7.813087	2.8157217	6.3868507	10.89887
a9	-0.379463	-0.491682	-0.524021	-0.344643	0.0184235	-0.245373
a10	1.8153434	2.919315	5.3345367	1.4949075	3.4152538	7.4371364
a11	-0.1204	-0.269499	-0.300858	-0.102221	0.204862	-0.115663
a12	1.8064245	3.6303847	5.4920229	1.5548522	5.2524448	9.073727
a13	-0.333822	-0.382002	-0.472208	-0.257016	-0.073086	-0.405943
a14	0.1303138	0.2427133	0.3189273	0.0977747	0.3906288	0.5483543
a15	-0.883405	-0.920044	-0.015118	-0.693341	1.5295359	2.3067831
a16	-0.176205	-0.248056	0.1798611	-0.121017	0.5328975	0.9581284
a17	-2.355574	-3.078356	-2.534781	-1.995488	-1.451075	1.6712454
a1_2	0.5999048	1.2824671	2.0574845	0.4652841	1.9753215	3.2611862
a1_3	0.0419517	0.0373262	0.1620228	0.0463833	-0.013908	0.1841405
a1_4	0.1185595	0.157573	-0.016541	0.1283695	0.0815293	-0.120727
a1_5	0.0873563	0.0755613	0.1751127	0.0754321	0.0204381	0.2621275
a1_6	-0.052174	-0.145467	-0.008223	-0.01483	-0.111411	-0.082529
a1_7	0.2817471	0.2756086	0.6077399	0.2615242	0.1406944	0.6537195

a1_8	-0.647645	-0.586467	-1.108541	-0.610516	-0.338663	-1.263848
a1_9	0.0754588	-0.037009	0.2506651	0.1043937	-0.062086	0.2415146
a1_10	-0.172045	-0.110928	-0.636992	-0.111199	-0.076205	-1.001535
a1_11	0.0243142	0.0041649	0.1166344	0.0148174	-0.01304	0.1791155
a1_12	-0.297051	-0.380269	-0.759517	-0.250971	-0.308993	-1.022502
a1_13	-0.037209	0.0149296	0.0530673	-0.043071	0.0163103	0.0982733
a1_14	0.1313383	0.1163983	0.3592729	0.1368866	0.0523091	0.3603768
a1_15	0.106066	0.0599606	0.5278877	0.0883387	0.0025741	0.6680153
a1_16	0.3870259	0.2289662	0.4847917	0.3244393	0.0520939	0.5594003
a1_17	0.6155191	0.4404918	0.5222574	0.5324071	0.1717199	0.2479882
a2_3	-0.017391	0.0637269	-0.022921	-0.041029	0.0423732	-0.026025
a2_4	0.0437527	0.0625336	-0.095185	0.0327049	0.0503292	-0.152829
a2_5	-0.10782	-0.139962	-0.177255	-0.104947	-0.066444	-0.206051
a2_6	-0.544293	-0.525895	-0.442945	-0.475228	-0.278492	-0.330378
a2_7	-0.05182	-0.192792	-0.14961	-0.046698	-0.154206	-0.168536
a2_8	0.2616982	0.299949	0.6510344	0.2759709	0.1345957	0.7481742
a2_9	-0.101351	-0.137696	-0.380961	-0.09944	-0.080487	-0.45584
a2_10	0.2329764	0.1797969	0.3224382	0.2062247	0.073667	0.3862521
a2_11	-0.057235	-0.072966	-0.094984	-0.07798	-0.064395	-0.0187
a2_12	0.0690952	0.1427311	0.3132333	0.0675473	0.1042521	0.3922599
a2_13	0.1741721	0.2572872	0.1743454	0.1683156	0.1532024	0.0858414
a2_14	0.2135098	0.2491849	0.1753558	0.1973877	0.1421318	0.0744563
a2_15	-0.073665	-0.09062	0.1448682	-0.034212	-0.056934	0.1638546
a2_16	-0.098093	-0.005739	0.1328867	-0.065508	0.0217387	0.2097444
a2_17	-0.607868	-0.637614	-0.962354	-0.53433	-0.379681	-0.852153
a3_4	1.1153872	2.0664093	2.8096541	0.9115011	2.9083762	4.5544005
a3_5	-0.030313	-0.039356	0.2099108	-0.006999	-0.033742	0.2683199
a3_6	0.1497128	0.0967659	0.0633907	0.1385526	0.0190794	0.0707599
a3_7	0.0278065	0.0244653	0.4727975	0.0620995	0.030165	0.5763378
a3_8	-0.182012	-0.150777	-0.499305	-0.196288	-0.108691	-0.623009
a3_9	0.4611717	0.3724663	0.3570719	0.3820035	0.1469981	0.3877777
a3_10	0.0300886	-0.11022	-0.314208	0.0411192	-0.117514	-0.518153
a3_11	-0.070703	-0.087792	-0.215249	-0.113038	-0.038016	-0.207285
a3_12	-0.193584	-0.273214	-0.628536	-0.173739	-0.223677	-0.830494
a3_13	0.1209354	0.063816	0.2856777	0.1633579	0.0089098	0.3177202
a3_14	-0.122872	-0.017258	0.1477082	-0.079276	0.0298161	0.181166
a3_15	0.0952338	0.1180439	0.2516933	0.0569601	0.0746783	0.3308623
a3_16	-0.034461	-0.032301	0.0138399	1.63E-05	0.0047187	-0.063045
a3_17	-0.249815	-0.292613	-0.493563	-0.242706	-0.164452	-0.528635
a4_5	-0.021656	-0.203279	-0.1221	-0.031481	-0.139142	-0.159405
a4_6	-0.245798	-0.224443	-0.164632	-0.185376	-0.099274	-0.203104
a4_7	-0.086484	-0.158946	-0.077254	-0.015203	-0.101569	-0.162738
a4_8	0.287349	0.3733743	0.2761729	0.2554767	0.2020936	0.2414148
a4_9	-0.00535	0.0388586	0.0089967	-0.025923	0.0500133	-0.054643
a4_10	0.0629498	0.1345412	0.3406227	0.0392178	0.0853453	0.5305618

a4_11	-0.129477	-0.128982	-0.208013	-0.171286	-0.082105	-0.135365
a4_12	0.4146964	0.5992237	0.5107561	0.3561166	0.3770742	0.5745098
a4_13	-0.315246	-0.203002	-0.421826	-0.305064	-0.070375	-0.469452
a4_14	-0.047248	-0.027166	0.163096	0.0211766	-0.002475	0.1178847
a4_15	-0.163076	-0.209894	-0.509552	-0.120606	-0.103517	-0.681321
a4_16	0.0270996	0.0384272	0.0058394	0.0522641	0.0204887	-0.018849
a4_17	-0.30685	-0.358834	-0.221716	-0.264185	-0.258073	0.0395281
a5_6	-0.135216	-0.155075	-0.118023	-0.077315	-0.07339	-0.127333
a5_7	-0.002259	0.0073752	-0.249098	-0.026114	-0.018121	-0.344852
a5_8	0.0856362	0.0938896	0.2887172	0.0519649	0.0721479	0.3431297
a5_9	-0.275037	-0.173559	-0.400132	-0.29821	-0.072221	-0.351684
a5_10	0.1888974	0.1915819	0.175741	0.1472594	0.1068239	0.1366895
a5_11	-0.233154	-0.20392	-0.42507	-0.223531	-0.083932	-0.512114
a5_12	0.1452342	0.1704064	0.0382357	0.10752	0.1003703	-0.04384
a5_13	-0.036614	-0.067055	-0.119989	-0.046547	-0.04312	-0.147343
a5_14	-0.100789	-0.073311	-0.07366	-0.110929	-0.033293	0.0283345
a5_15	-0.218496	-0.245982	-0.369377	-0.221549	-0.149893	-0.32041
a5_16	0.1149164	0.1327844	-0.071849	0.0917604	0.0732333	-0.158889
a5_17	-0.042759	0.0567735	-0.099846	-0.035169	0.0443459	-0.046224
a6_7	0.2795138	0.2523918	0.4261334	0.2676845	0.1196099	0.3866868
a6_8	-0.107971	-0.086843	-0.281851	-0.117631	-0.070745	-0.345126
a6_9	-0.103239	-0.081252	-0.058219	-0.087051	-0.016948	-0.082028
a6_10	0.0848372	0.057358	0.0857609	0.0752615	0.0017639	0.0558138
a6_11	-0.178253	-0.18379	-0.156734	-0.207133	-0.112554	-0.110097
a6_12	0.1038405	0.0302887	-0.107027	0.098448	-0.036566	-0.289206
a6_13	-0.113473	-0.005213	0.1508962	-0.095875	0.0397723	0.2311169
a6_14	-0.046201	-0.056652	-0.003487	-0.045569	-0.044903	0.0484582
a6_15	0.1131808	0.0388356	0.2078789	0.0793376	0.0179749	0.2307314
a6_16	0.1792553	0.0801898	0.2950481	0.1553434	-0.005591	0.3779663
a6_17	0.3254794	0.3772244	0.2886777	0.2514266	0.2430089	0.2014796
a7_8	-0.547254	-0.479658	-0.791914	-0.511262	-0.245893	-0.854406
a7_9	0.0145226	-0.019274	0.0632661	0.0366105	-0.030555	0.0572151
a7_10	-0.214955	-0.12578	-0.575845	-0.265101	-0.059168	-0.631304
a7_11	-0.060607	0.0068461	-0.169842	-0.072031	0.0201238	-0.1756
a7_12	-0.22131	-0.188391	-0.362363	-0.234303	-0.098219	-0.361931
a7_13	-0.000594	0.140348	-0.208694	-0.086708	0.0915073	-0.256029
a7_14	-0.03283	-0.013766	-0.171656	-0.053873	0.0600867	-0.194697
a7_15	-0.099976	-0.175774	-0.030337	-0.092035	-0.108645	-0.018478
a7_16	0.2142779	0.1571219	0.409651	0.2469797	0.0472353	0.3950137
a7_17	0.5236358	0.4478549	0.4857981	0.4648292	0.2380272	0.2942352
a8_9	-0.296911	-0.206097	-0.606835	-0.280767	-0.064814	-0.718176
a8_10	0.2005724	0.1433024	0.3050053	0.2144792	-0.019658	0.3741695
a8_11	-0.130179	-0.147091	-0.22214	-0.137047	-0.080615	-0.228554
a8_12	0.4916986	0.5347877	0.6065871	0.4495904	0.2763289	0.5891531
a8_13	0.0742738	0.056434	0.2369354	0.0694764	0.0286211	0.244055

a8_14	0.0496794	0.0626456	-0.101039	0.0546644	0.0390904	-0.165109
a8_15	-0.402321	-0.324989	-0.613817	-0.319521	-0.090056	-0.727749
a8_16	-0.291894	-0.267949	-0.304866	-0.260064	-0.106499	-0.260005
a8_17	-0.809712	-0.856736	-0.801222	-0.740231	-0.465701	-0.376972
a9_10	-0.032687	-0.022611	-0.29684	-0.086324	-0.036904	-0.392519
a9_11	0.0079705	0.0766022	-0.027985	-0.010797	0.0745944	-0.09058
a9_12	-0.341501	-0.303849	-0.344573	-0.341448	-0.130943	-0.349018
a9_13	-0.140645	-0.100889	-0.243018	-0.145709	-0.075401	-0.334867
a9_14	0.0071337	0.0504805	0.0956093	-0.009273	0.0566723	0.1340942
a9_15	0.2090824	0.1629868	0.483894	0.2124993	0.0911158	0.4997221
a9_16	-0.067004	0.0214644	0.0279743	-0.069135	0.0277108	0.1270174
a9_17	0.172769	0.098793	0.5474955	0.1695354	0.0431175	0.5798257
a10_11	-0.25346	-0.306643	-0.395002	-0.228187	-0.170221	-0.43099
a10_12	0.2868609	0.4004083	0.5019076	0.2313869	0.1453187	0.6179802
a10_13	-0.07363	-0.03823	-0.175029	-0.04946	0.0050663	-0.338725
a10_14	0.1948782	0.1820036	0.1389397	0.1538027	0.0892332	0.1307266
a10_15	0.0018082	0.0250066	-0.568976	-0.019681	0.0373542	-0.852405
a10_16	-0.305802	-0.337456	-0.532223	-0.263459	-0.188269	-0.580698
a10_17	-0.510844	-0.459271	-0.36881	-0.473258	-0.255702	-0.108633
a11_12	-0.23331	-0.253558	-0.519449	-0.231095	-0.138513	-0.713366
a11_13	-0.232122	-0.127512	-0.299858	-0.236968	-0.065598	-0.281905
a11_14	-0.139512	-0.107209	0.0532566	-0.101255	0.0104088	0.1100967
a11_15	-0.075896	-0.059152	-0.044957	-0.075432	-0.028563	-0.001728
a11_16	0.1691673	0.1803518	0.3175095	0.1559836	0.1124661	0.3436524
a11_17	0.2964437	0.2595843	0.1617919	0.2588674	0.1566273	-0.007852
a12_13	-0.124552	-0.109888	-0.136125	-0.136507	-0.084859	-0.11712
a12_14	-0.007553	0.1657	0.0782977	-0.052888	0.1317407	0.1814201
a12_15	-0.374109	-0.324082	-0.580365	-0.331806	-0.096398	-0.720303
a12_16	-0.326671	-0.261108	-0.619931	-0.325488	-0.107585	-0.717982
a12_17	-0.734127	-0.804434	-0.457854	-0.652034	-0.479865	-0.01808
a13_14	-0.191125	-0.224292	-0.184509	-0.16033	-0.099761	-0.242528
a13_15	-0.407889	-0.296283	-0.277804	-0.393969	-0.090465	-0.226311
a13_16	0.2627308	0.2493874	0.4190434	0.1888291	0.1368978	0.5035985
a13_17	0.165739	0.2263217	-0.030266	0.0899069	0.1372465	-0.156438
a14_15	-0.136667	-0.005096	-0.281702	-0.126689	0.0095336	-0.313566
a14_16	-0.259427	-0.178126	-0.244179	-0.253101	-0.067343	-0.222895
a14_17	-0.121797	-0.070369	-0.220187	-0.152701	-0.02622	-0.202912
a15_16	0.3244208	0.3225417	0.7270602	0.294061	0.1853583	0.8182162
a15_17	0.5807804	0.4577959	0.482116	0.5075156	0.2203953	0.1862687
a16_17	0.1933999	0.0579931	0.3075563	0.1682694	0.004387	0.2972193

Annexe 3-8 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins de refroidissement (L171)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	7.5305354	15.182379	28.428202	5.7571425	37.097875	67.4775
a1	-1.017374	-0.772953	0.9586231	-0.915093	1.8197084	2.0509319
a2	1.1248511	1.9660366	2.3648187	0.9488906	2.708292	4.6007373
a3	0.1161847	0.7256737	1.7379887	-0.018195	2.436912	3.181086
a4	1.3516756	2.6284841	3.1594894	1.1558123	3.7701785	6.1380141
a5	-0.127165	-0.273858	-0.410288	-0.177683	-0.382009	-0.74616
a6	0.0339951	0.2026166	0.947308	0.0335753	1.2557095	1.2580786
a7	-0.860234	-1.055068	-0.447465	-0.672669	-0.246719	-1.124546
a8	3.3454484	5.4838651	5.9597908	2.8596343	6.3993442	11.128104
a9	-0.76594	-0.839281	-0.305504	-0.698191	-0.106731	-1.02823
a10	1.5965143	2.855477	3.1950417	1.2363883	3.4457172	7.275
a11	-0.268469	-0.4545	-0.023918	-0.233929	0.0971083	-0.05153
a12	1.7580498	3.7702958	4.4996299	1.4635197	5.3921708	9.1146529
a13	-0.169104	-0.202192	-0.039604	-0.194746	0.025837	-0.616887
a14	0.1522706	0.3954162	0.4482262	0.1154419	0.5076465	0.917465
a15	-0.783722	-0.884624	0.8393011	-0.612922	1.5197136	1.9933178
a16	-0.225258	-0.275974	0.2879339	-0.162275	0.4984265	0.9133039
a17	-2.120992	-2.792805	-2.17731	-1.822346	-1.300897	2.0633172
a1_2	0.4591445	1.0916846	1.5280307	0.3210747	1.8524599	2.9526973
a1_3	0.2143	0.0896578	0.0495986	0.2083775	-0.002167	0.410438
a1_4	-0.38341	-0.314892	-0.190767	-0.339128	-0.137424	-0.609963
a1_5	-0.089682	-0.127871	-0.105594	-0.035257	-0.093867	0.3367396
a1_6	-0.086543	-0.064932	-0.061392	-0.062333	-0.045051	0.3954902
a1_7	0.2664568	0.2300308	0.1465284	0.2885869	0.0937855	0.6416879
a1_8	-0.556128	-0.554085	-0.420791	-0.518483	-0.341363	-1.421603
a1_9	0.4256036	0.4238596	0.2685636	0.3577729	0.1901615	0.8903293
a1_10	-0.335853	-0.36361	-0.269158	-0.236548	-0.236695	-1.3381
a1_11	0.2477498	0.2298018	0.1496036	0.2215506	0.1117396	0.336641
a1_12	-0.384084	-0.453159	-0.357819	-0.290889	-0.330583	-0.858952
a1_13	0.2290642	0.1956115	0.123463	0.1988713	0.0799425	0.3250315
a1_14	0.1452937	0.0367061	0.0363013	0.1998945	-0.004619	0.0648771
a1_15	0.4589742	0.4262655	0.275412	0.3886736	0.204496	1.0591729
a1_16	0.05187	0.0048439	-0.004247	0.0231715	-0.013355	0.2425455
a1_17	0.5545097	0.444458	0.3199718	0.4909193	0.2092587	0.310215
a2_3	-0.102879	-0.051858	-0.061554	-0.116812	-0.050644	-0.056163
a2_4	0.0174471	0.080101	0.0800709	0.0712937	0.0834507	0.1872166
a2_5	-0.080579	-0.037663	-0.017795	-0.09174	0.0068297	-0.082728
a2_6	-0.108835	-0.049699	-0.041923	-0.100763	-0.021741	-0.053081
a2_7	-0.040682	-0.111307	-0.082558	-0.015537	-0.081457	-0.21128
a2_8	0.3997703	0.4059463	0.264447	0.326759	0.1875614	0.3490736
a2_9	-0.089445	-0.074703	-0.036328	-0.025119	-0.032265	0.0851643
a2_10	0.1338154	0.1294816	0.086288	0.1290697	0.0559439	0.614697

a2_11	0.0663373	0.1303506	0.086496	-0.030395	0.0845876	-0.415774
a2_12	-0.079331	0.0728964	0.0557049	-0.04194	0.0931997	0.1306423
a2_13	0.2696965	0.2300492	0.149909	0.2006373	0.105804	0.1979802
a2_14	0.1032732	0.1482353	0.1000844	0.0802135	0.0912914	0.0148211
a2_15	-0.182989	-0.205504	-0.134415	-0.156115	-0.111736	-0.122484
a2_16	-0.199808	-0.146365	-0.102103	-0.203068	-0.054544	-0.460266
a2_17	-0.351224	-0.406885	-0.324537	-0.307682	-0.267253	-0.507376
a3_4	0.9598068	1.8893325	2.3084487	0.7119853	2.8038917	4.1035633
a3_5	-0.100838	-0.233884	-0.150056	-0.008969	-0.155043	-0.149189
a3_6	0.0428994	0.0222037	-0.001779	0.0432816	-0.016804	0.2887092
a3_7	0.2052733	0.145416	0.0878589	0.1981227	0.0471034	0.2901385
a3_8	-0.137797	-0.102069	-0.102628	-0.185349	-0.079169	-0.840266
a3_9	0.3396347	0.3395581	0.2128917	0.2603758	0.1652317	0.2890013
a3_10	-0.324621	-0.22787	-0.182643	-0.327047	-0.12044	-0.72741
a3_11	-0.145021	-0.166566	-0.114772	-0.095906	-0.093957	-0.033835
a3_12	-0.03717	0.0017258	-0.042403	-0.079909	-0.04645	-0.683892
a3_13	0.1680145	0.1270723	0.0930988	0.2078044	0.0590266	0.4033798
a3_14	0.0198113	0.0343735	0.0208228	0.0385917	0.0175075	-0.106659
a3_15	0.1168541	0.1065596	0.0551808	0.1077405	0.0295403	0.1720227
a3_16	0.1984788	0.1713534	0.108974	0.1879683	0.0723323	0.3553494
a3_17	0.0977609	0.0158856	0.0076643	0.0666357	-0.005095	-0.032556
a4_5	0.0700451	0.1181044	0.0830433	0.0227671	0.0788902	0.0152794
a4_6	0.0963142	0.0763006	0.0466517	0.0868795	0.034217	0.4471979
a4_7	-0.504698	-0.420429	-0.289612	-0.459777	-0.196943	-0.168123
a4_8	0.487832	0.5510646	0.3795238	0.4124632	0.2895758	0.3278686
a4_9	-0.187406	-0.158871	-0.10814	-0.156685	-0.083403	-0.233026
a4_10	0.2001166	0.2133362	0.142059	0.1923514	0.1067921	0.4946829
a4_11	-0.142268	-0.106909	-0.066566	-0.15094	-0.046376	-0.194973
a4_12	0.4263595	0.5109218	0.3552822	0.3820412	0.2971759	0.2518424
a4_13	-0.142032	-0.072722	-0.046016	-0.180048	-0.0193	-0.140558
a4_14	-0.119265	-0.072114	-0.050618	-0.170149	-0.023006	-0.45804
a4_15	-0.267848	-0.263631	-0.145354	-0.243175	-0.093841	-0.355879
a4_16	-0.279858	-0.274214	-0.189074	-0.253644	-0.140978	-0.599355
a4_17	-0.456372	-0.46487	-0.374091	-0.436941	-0.293262	-0.436578
a5_6	0.1563314	0.1582434	0.0963268	0.1564842	0.0735533	0.1709326
a5_7	0.0318334	0.0644115	0.0643084	0.0684598	0.0485586	0.2808973
a5_8	0.0881577	0.0791128	0.0533199	0.0179682	0.0476708	-0.219573
a5_9	0.0252521	-0.009168	-0.013829	0.0090817	-0.013187	0.1529502
a5_10	-0.158925	-0.12	-0.082367	-0.16749	-0.049759	-0.336613
a5_11	-0.250444	-0.194646	-0.132259	-0.17253	-0.098835	-0.120732
a5_12	0.1429399	0.149949	0.1294273	0.0997866	0.1041446	0.0021243
a5_13	0.1165606	0.0794514	0.0665271	0.0947251	0.0475886	0.2068509
a5_14	-0.153369	-0.143031	-0.098221	-0.073825	-0.073249	0.1997239
a5_15	-0.022348	-0.041679	-0.01954	0.0218897	-0.021508	0.385461
a5_16	0.0291919	0.0756863	0.0635973	0.0771869	0.057686	0.3659972

a5_17	0.0435305	-0.018956	-0.040108	0.0912352	-0.055584	-0.176677
a6_7	-0.112579	-0.130665	-0.114783	-0.101694	-0.093278	0.135044
a6_8	0.1025406	0.1228261	0.0561457	0.1029859	0.0163376	-0.317045
a6_9	-0.03735	-0.062554	-0.041837	-0.046621	-0.035094	0.1647529
a6_10	-0.180161	-0.19982	-0.146547	-0.149622	-0.129998	-0.442867
a6_11	-0.103072	-0.002951	0.0001533	-0.097212	0.0346861	0.2061654
a6_12	0.0584168	0.0714173	0.0413215	0.0938863	0.0116642	-0.082769
a6_13	0.2509516	0.189998	0.1171733	0.2368495	0.068405	0.289468
a6_14	0.0971735	0.0093882	-0.003517	0.1341664	-0.030015	0.4663144
a6_15	-0.248514	-0.161107	-0.095439	-0.232992	-0.04545	0.293526
a6_16	-0.289733	-0.257407	-0.157974	-0.194316	-0.107792	0.1234924
a6_17	0.056115	-0.004071	0.0140367	0.0820698	-0.006768	-0.041653
a7_8	-0.442943	-0.502518	-0.352633	-0.391769	-0.292699	-0.838603
a7_9	0.1445223	0.200676	0.1436267	0.0989893	0.128505	0.3319897
a7_10	0.0390918	-0.027654	-0.005853	0.0467047	-0.013573	-0.404004
a7_11	0.1422281	0.1460816	0.092506	0.1483297	0.0822094	0.2911708
a7_12	-0.274906	-0.252457	-0.163322	-0.269756	-0.120741	-0.390343
a7_13	0.1262278	0.1410146	0.0597628	0.141499	0.0304038	0.45448
a7_14	-0.086204	-0.040912	0.0148219	-0.096112	0.0571679	0.0024121
a7_15	0.3362807	0.282144	0.1718813	0.3148639	0.1138288	0.7307156
a7_16	-0.018554	-0.019247	-0.015742	-0.008376	-0.010415	0.1166294
a7_17	0.3139011	0.3340304	0.2778938	0.2914995	0.2230357	0.1614121
a8_9	-0.234609	-0.16623	-0.096944	-0.168466	-0.056741	-0.216154
a8_10	0.541603	0.4116496	0.2259747	0.5233796	0.0969762	1.0510988
a8_11	-0.215337	-0.172952	-0.115661	-0.192343	-0.073914	-0.238741
a8_12	0.2796918	0.2950396	0.1871352	0.2551069	0.1454203	0.4035831
a8_13	-0.318317	-0.245856	-0.17524	-0.324858	-0.109303	-0.499467
a8_14	-0.094179	-0.066078	-0.047495	-0.093838	-0.031445	0.0151596
a8_15	-0.469726	-0.45233	-0.249224	-0.391721	-0.183196	-1.128738
a8_16	-0.086664	-0.066239	-0.029342	-0.08728	-0.014848	-0.318128
a8_17	-0.698381	-0.71574	-0.536736	-0.64177	-0.384455	-0.222359
a9_10	-0.069454	-0.032187	-0.020419	-0.070089	-0.012215	-0.50993
a9_11	-0.006099	0.0026542	-0.018638	-0.031492	-0.005322	0.1406909
a9_12	0.0464425	-0.016389	-0.025244	0.0089434	-0.050602	-0.519443
a9_13	-0.054721	0.0490779	0.007938	-0.039341	0.0253601	0.268104
a9_14	0.005992	0.0194074	0.0228129	-0.028628	0.0357391	0.043866
a9_15	0.0739252	0.1297702	0.0869738	0.0393094	0.0904178	0.1673817
a9_16	-0.086134	-0.062817	-0.037043	-0.107626	-0.013728	-0.212474
a9_17	0.2652265	0.1371995	0.1263104	0.2369073	0.0585338	0.1050101
a10_11	-0.213665	-0.277988	-0.198455	-0.164431	-0.18272	-0.478149
a10_12	0.300462	0.4295111	0.2353622	0.246733	0.1793038	0.708453
a10_13	0.0211658	0.0248702	0.0272338	-0.008569	0.0254707	-0.362465
a10_14	-0.042612	-0.012719	-0.008622	-0.066392	0.0104113	-0.051609
a10_15	-0.273013	-0.255695	-0.124711	-0.230632	-0.086874	-0.919541
a10_16	-0.03481	0.0244177	0.0317743	-0.016321	0.0465078	-0.339972

a10_17	-0.488866	-0.471888	-0.362382	-0.413691	-0.265715	-0.335566
a11_12	-0.217348	-0.367144	-0.270785	-0.166123	-0.281175	-0.654263
a11_13	-0.040673	-0.033452	-0.047647	0.0174386	-0.05922	0.1057646
a11_14	0.0329832	0.0538974	0.0751645	0.0605722	0.083763	0.2473824
a11_15	0.1377226	0.1148767	0.0583072	0.1039141	0.0383232	0.4731284
a11_16	0.0953942	0.1280786	0.0790636	0.1003798	0.0763395	0.2742481
a11_17	0.4295778	0.4643472	0.3542266	0.3540401	0.2886179	0.0404554
a12_13	-0.083694	-0.100065	-0.047932	-0.019767	-0.044177	0.1162747
a12_14	-0.072849	-0.020821	-0.031031	-0.099369	-0.015491	-0.156867
a12_15	-0.288433	-0.307542	-0.148545	-0.191353	-0.114975	-0.609933
a12_16	-0.087444	-0.076724	-0.02392	-0.05953	-0.011968	-0.019573
a12_17	-0.840026	-0.884171	-0.670488	-0.749686	-0.521629	-0.370772
a13_14	0.1582078	0.1605465	0.119897	0.1878743	0.0931932	0.3227394
a13_15	-0.026663	-0.074374	-0.062405	-0.04489	-0.065793	0.0481184
a13_16	-0.051968	-0.080542	-0.043927	-0.017561	-0.045196	-0.109515
a13_17	0.0656953	0.0571674	0.0646955	0.054158	0.0447498	0.1948289
a14_15	0.0242077	0.0114396	0.0130029	0.0929908	0.0033797	0.3409191
a14_16	-0.074815	-0.115393	-0.082144	0.0054594	-0.084948	-0.272297
a14_17	-0.017146	-0.044841	-0.046791	-0.029409	-0.041607	0.0676664
a15_16	-0.087677	-0.082854	-0.051959	-0.073837	-0.037512	0.3747085
a15_17	0.4023773	0.2776301	0.2550708	0.3001066	0.1751662	-0.13093
a16_17	-0.0881	-0.048591	-0.000314	-0.103866	0.0151969	-0.32323
a1_1	0.0678621	0.3004729	0.2678201	-0.056207	0.3272911	0.6153557
a2_2	0.926988	0.778694	0.5357254	0.8918879	0.3179084	1.1693555
a3_3	-0.352311	-0.123532	-0.124402	-0.285673	-0.087319	0.4632821
a4_4	0.3815477	0.4246807	0.2287329	0.3301103	0.1640953	0.3659972
a5_5	-0.209608	-0.18046	-0.217975	-0.120712	-0.176896	0.4628185
a6_6	-0.117564	0.0695944	0.0535771	-0.17068	0.0938323	0.1427864
a7_7	0.055322	-0.029095	0.0010173	0.0661203	0.0006109	0.3812746
a8_8	-0.510034	-0.46471	-0.564452	-0.326949	-0.626339	-0.824525
a9_9	-0.18545	-0.14828	-0.063575	-0.250538	0.0017104	-0.214718
a10_10	-0.129503	-0.565311	-0.682201	-0.303931	-0.771819	-1.952031
a11_11	0.0089906	-0.00288	-0.012919	0.0138565	-0.051976	0.5899817
a12_12	0.0791509	0.1035505	-0.264061	-0.119851	-0.37334	-1.982765
a13_13	0.4185123	0.346445	0.2682876	0.2594606	0.1830187	-0.554936
a14_14	-0.106982	-0.238369	-0.188458	0.0678496	-0.166289	0.1441654
a15_15	-0.067588	-0.156486	-0.099864	-0.119164	-0.086347	0.3931941
a16_16	-0.053497	-0.067117	-0.065104	0.0638246	-0.045681	0.1467428
a17_17	-0.082537	0.0879653	0.4624814	0.0002086	0.4503704	-0.256101

Annexe 3-9 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins d'énergie finale (L18)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	16.252468	40.974562	79.776815	89.331116	62.124958	110.17994
a1	3.8919574	7.6042566	14.609332	18.20493	9.5413932	16.18459
a2	0.0763949	-0.169173	-0.492928	-1.387026	0.1550872	0.8129064
a3	1.8386998	5.1721593	8.9039139	11.721026	6.9129066	10.801067
a4	-1.363392	0.403088	-1.505203	-1.398006	1.8111869	1.5158636
a5	-0.315972	0.1040342	-0.82483	0.4801754	-0.063202	-1.212552
a6	1.4088461	2.8690991	6.3005286	6.6687194	4.1341294	7.6017415
a7	0.1069009	1.0748675	2.6177392	4.8186346	2.1556099	3.0000302
a8	1.5132463	2.9999115	2.7908642	-0.149411	3.6436573	5.2155524
a9	1.2863046	2.5372452	4.5201541	5.5707017	3.0518692	4.5333635
a10	-2.188517	-2.638429	-3.115886	-5.656356	-2.485252	-3.202099
a11	1.302649	2.5160209	4.9201311	4.8012776	3.3521661	6.097343
a12	-1.364322	0.0085254	-2.081685	-1.610026	1.4488703	1.0841419
a13	1.046546	1.3125371	1.5980933	1.3220891	1.8165716	2.9184763
a14	0.7812169	0.5193886	1.2193468	0.178105	0.2415394	1.327047
a15	3.960417	6.9270568	14.716977	16.757467	8.6293886	15.099616
a16	1.037293	2.1596016	4.0746159	5.3161458	2.9476575	4.2348346
a17	-1.379464	-2.136031	0.1815856	-1.078296	-1.100799	3.0069139

Annexe 3-10 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins d'énergie finale (L35)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	38.973168	38.973168	74.738333	84.618369	61.580483	109.15105
a1	6.6169273	6.6169273	13.131696	17.34562	9.4091424	15.596765
a2	0.4457346	0.4457346	-0.654754	-1.68836	1.012113	1.4476491
a3	6.5879697	6.5879697	11.362639	12.507127	8.0290727	13.567697
a4	1.1967558	1.1967558	0.5239974	-0.928596	1.8386597	2.852974
a5	-0.586461	-0.586461	-1.146921	-0.412723	-0.822977	-1.232849
a6	3.406964	3.406964	6.3321818	7.2750077	4.6391522	7.4538018
a7	1.7913821	1.7913821	3.5587117	5.0966342	2.632116	4.0085984
a8	2.8322182	2.8322182	2.0023182	-0.976203	3.7118806	5.3868491
a9	2.1709235	2.1709235	4.2713555	5.6550388	2.9172485	4.364835
a10	-2.876396	-2.876396	-4.56953	-7.079611	-2.402532	-3.673229
a11	1.3486041	1.3486041	3.474821	4.9844731	2.3048047	3.6755708
a12	0.2773955	0.2773955	-1.645085	-3.109917	1.9082015	2.9107126
a13	0.2872537	0.2872537	0.8398265	1.8447907	0.5058948	0.5348508
a14	-0.414602	-0.414602	-0.372659	0.1359287	-0.580786	-1.029046
a15	5.4371354	5.4371354	12.054844	15.491328	7.9833664	13.316304
a16	1.6066331	1.6066331	4.0132254	5.1086614	2.5075458	4.4015676
a17	-3.032402	-3.032402	-1.90464	-2.074548	-1.506738	1.165132
a1_1	-1.534468	-1.534468	-1.881112	-1.133315	-0.980367	-1.69759

a2_2	0.7725065	0.7725065	0.952624	-0.33901	0.2531347	0.7324229
a3_3	-0.209572	-0.209572	-0.43725	-0.5561	0.0186541	0.277319
a4_4	1.3270566	1.3270566	1.947015	0.3896798	1.247265	2.8881526
a5_5	-0.007799	-0.007799	-0.348163	0.2591732	0.2202761	-0.363576
a6_6	0.4497245	0.4497245	0.2826268	-0.154994	0.6084013	0.7286417
a7_7	-0.014147	-0.014147	0.2113315	0.1664491	0.0989577	-0.179289
a8_8	1.1158895	1.1158895	1.5393222	1.6755739	0.3063442	0.5188245
a9_9	0.4898192	0.4898192	1.163052	1.1696122	-0.118858	-0.310427
a10_10	1.2809087	1.2809087	2.0967263	0.7292479	1.209754	2.6002514
a11_11	0.6384045	0.6384045	0.7428785	0.9283271	0.282413	-0.06233
a12_12	-0.642778	-0.642778	-0.586532	-0.168172	-0.781916	-0.920638
a13_13	1.5366553	1.5366553	2.4185372	2.0103586	0.5903129	0.8790073
a14_14	-0.596541	-0.596541	-0.716059	-0.945382	-0.338999	-0.151837
a15_15	-0.308855	-0.308855	0.1984103	0.0520241	-0.629445	-0.694909
a16_16	-0.558527	-0.558527	-0.195594	0.6963268	-0.462181	-0.273114
a17_17	-0.740872	-0.740872	-1.260537	0.489649	-0.505106	-2.666496

Annexe 3-11 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins d'énergie finale (L154)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	17.639527	42.405113	81.92089	89.940972	63.235283	112.47142
a1	2.5873619	6.9344217	13.407404	17.656297	9.5566165	15.462844
a2	-0.312088	0.0938501	-0.777622	-1.819056	0.6628673	0.8732154
a3	2.6139911	5.7445349	9.7565425	11.518363	7.4876131	11.900454
a4	-0.556402	0.5043334	-0.855698	-1.369969	1.4246712	1.5736566
a5	-0.517683	-0.483691	-0.857889	-0.070992	-0.571138	-0.722501
a6	1.053626	2.7948027	5.3180909	7.0987224	4.0255972	6.163423
a7	0.1237051	1.3006496	2.92061	4.920524	2.1856868	3.0886031
a8	1.5202558	2.9306092	2.635554	-0.899631	3.730393	6.0030454
a9	0.9668327	1.9408487	4.0799128	5.2175059	2.5378412	4.1463085
a10	-1.851804	-2.457207	-3.357384	-6.543379	-2.266232	-2.561101
a11	1.2217322	2.2657812	4.4051247	5.6202763	2.8101324	4.3044019
a12	-0.308945	0.9918053	-0.529783	-2.104097	2.3794335	3.6495144
a13	-0.006615	0.4513145	1.0838731	1.93705	0.775234	1.0126787
a14	-0.205451	-0.166278	-0.542035	-0.4024	-0.06193	-0.335809
a15	2.1800766	5.5046826	11.76687	15.030976	8.0673651	13.224983
a16	0.8685755	1.9978581	4.3060879	5.1948016	2.8305268	4.7214999
a17	-2.536295	-3.171457	-1.621061	-1.997413	-1.564913	1.4680933
a1_2	-0.775504	-0.383376	-1.270699	-1.699369	0.176311	-0.025722
a1_3	0.1909734	0.0903132	0.2521813	-0.135928	0.0670475	0.3112193
a1_4	0.083775	0.1243886	-0.057764	0.1384826	0.0561269	-0.159585
a1_5	0.1830483	0.2125668	0.3780014	0.1064807	0.1464838	0.4184743
a1_6	-0.242914	-0.27254	-0.285763	-0.216485	-0.239095	-0.407393
a1_7	0.5262054	0.4161757	0.9456435	0.2155021	0.3055943	0.9934779

a1_8	-0.900686	-0.825854	-1.681229	-0.652506	-0.616807	-1.77359
a1_9	0.0037344	0.001029	0.2757941	0.0149054	-0.012198	0.2075972
a1_10	-0.674132	-0.409208	-1.014955	-0.07044	-0.411961	-1.484237
a1_11	0.0927679	0.009161	0.1158449	-0.129202	0.0110619	0.2600401
a1_12	-0.526147	-0.566369	-1.22341	-0.243399	-0.537457	-1.498896
a1_13	0.0634438	0.059897	0.1070715	-0.076303	0.0651837	0.2246439
a1_14	0.1431191	0.2504045	0.6484776	0.1995374	0.2095401	0.6199368
a1_15	0.4027695	0.3535184	1.045455	0.215933	0.3346535	1.2448448
a1_16	0.6868306	0.4950634	0.9108356	0.3986999	0.3403926	1.0039329
a1_17	0.6243246	0.5362303	0.7085436	0.5528109	0.2810139	0.3278893
a2_3	-0.008876	0.083427	0.0486421	-0.032184	0.075947	0.0340988
a2_4	-0.07626	-0.06048	-0.238976	-0.004185	-0.084975	-0.313149
a2_5	-0.223004	-0.227918	-0.318677	-0.138432	-0.157444	-0.409798
a2_6	-0.751043	-0.593408	-0.736757	-0.461506	-0.363668	-0.575797
a2_7	-0.196414	-0.181799	-0.271915	-0.033691	-0.134647	-0.331841
a2_8	0.491901	0.5511286	1.2307316	0.3824116	0.4199308	1.3478216
a2_9	-0.32393	-0.275047	-0.698238	-0.141013	-0.237017	-0.820761
a2_10	0.630993	0.4349699	0.7090376	0.2648207	0.3443035	0.8053812
a2_11	-0.066149	-0.03671	-0.091705	-0.052963	-0.017324	0.0171574
a2_12	0.203679	0.2603422	0.5953348	0.104906	0.2338687	0.6832709
a2_13	0.2271425	0.2476293	0.2619031	0.1615267	0.1427866	0.1772762
a2_14	0.1899567	0.1858859	0.2139887	0.2018362	0.0736328	0.0839379
a2_15	-0.186696	-0.053223	0.2021793	-0.000427	0.0055316	0.1457429
a2_16	-0.035144	0.0602469	0.2900051	-0.063003	0.0997214	0.3941488
a2_17	-0.81492	-0.911098	-1.631306	-0.614496	-0.694792	-1.365278
a3_4	-0.14747	0.5877003	-0.438596	-0.98509	1.2406036	1.496711
a3_5	-0.003502	0.1101689	0.4144354	0.0454267	0.118883	0.4568092
a3_6	0.1115578	0.0863233	0.0599393	0.0224683	0.0158731	0.0382519
a3_7	0.1740044	0.3034961	0.9162374	0.0976599	0.345382	0.9507408
a3_8	-0.328679	-0.336334	-0.810728	-0.215814	-0.301565	-0.929029
a3_9	0.7196451	0.4878633	0.6284857	0.34729	0.2788174	0.6666527
a3_10	-0.448039	-0.352621	-0.668805	0.0549972	-0.382475	-1.04195
a3_11	-0.096199	-0.193897	-0.445393	-0.235573	-0.149875	-0.406425
a3_12	-0.507124	-0.485139	-1.058667	-0.220815	-0.471838	-1.384877
a3_13	0.1551028	0.1864855	0.505973	0.1907072	0.158325	0.5284731
a3_14	-0.088791	0.0441386	0.2968327	-0.027654	0.1049305	0.3283865
a3_15	0.3310767	0.3040977	0.5920066	0.076	0.2827559	0.669896
a3_16	-0.093255	-0.053867	-0.021753	0.0146968	-0.023894	-0.165681
a3_17	-0.473872	-0.466097	-0.900213	-0.327826	-0.367188	-0.904268
a4_5	-0.141027	-0.184841	-0.289499	-0.016144	-0.12003	-0.350957
a4_6	-0.40539	-0.275024	-0.334493	-0.179248	-0.159251	-0.437781
a4_7	-0.194226	-0.176822	-0.171178	0.0176152	-0.128119	-0.315529
a4_8	0.4269122	0.3778336	0.4543197	0.2031745	0.2121416	0.4345223
a4_9	-0.023978	0.0495694	0.0458454	-0.030154	0.0626939	-0.119687
a4_10	0.478391	0.3682461	0.7680091	0.0353333	0.3458117	1.0604919

a4_11	-0.088372	-0.11671	-0.269742	-0.174057	-0.072364	-0.163661
a4_12	0.7124875	0.6875689	0.8837918	0.3355737	0.478031	1.0358708
a4_13	-0.433915	-0.364339	-0.73201	-0.34996	-0.254417	-0.774997
a4_14	-0.082371	0.0131435	0.2555547	0.0801003	0.0394899	0.201059
a4_15	-0.488471	-0.450515	-1.041389	-0.181698	-0.374425	-1.273943
a4_16	0.0406556	0.011081	-0.05377	0.0555687	-0.013601	-0.00754
a4_17	-0.20038	-0.286579	-0.236205	-0.220517	-0.181502	0.2171041
a5_6	-0.230364	-0.147044	-0.191721	-0.081217	-0.067185	-0.239239
a5_7	-0.225839	-0.189902	-0.575636	-0.089287	-0.255148	-0.633388
a5_8	0.216206	0.2387414	0.5838961	0.0979347	0.2450077	0.6252235
a5_9	-0.335129	-0.293241	-0.665507	-0.347152	-0.211906	-0.505678
a5_10	0.2557104	0.1699102	0.2232249	0.1191745	0.1238282	0.2342988
a5_11	-0.459689	-0.370907	-0.777761	-0.295558	-0.280765	-0.917626
a5_12	0.1987041	0.1244577	0.0195763	0.074065	0.0643255	-0.035528
a5_13	-0.134069	-0.151808	-0.295839	-0.085506	-0.139308	-0.337362
a5_14	-0.049335	-0.067211	-0.036185	-0.124845	-0.023866	0.0798133
a5_15	-0.414934	-0.37266	-0.669958	-0.26096	-0.310483	-0.650359
a5_16	0.090706	0.0210391	-0.192413	0.0356691	-0.069868	-0.309478
a5_17	0.0424729	0.0466627	-0.109152	-0.075057	0.046591	0.0342258
a6_7	0.3935709	0.3473615	0.7003488	0.2642559	0.2329921	0.5954837
a6_8	-0.050208	-0.064982	-0.297378	-0.131353	-0.03635	-0.307421
a6_9	-0.117847	-0.100561	-0.13033	-0.132234	-0.037381	-0.187739
a6_10	0.1288526	0.1732309	0.3167719	0.2048373	0.134371	0.2400439
a6_11	-0.23048	-0.220077	-0.269385	-0.272331	-0.152025	-0.188592
a6_12	0.055627	0.0085623	-0.153189	0.1362503	-0.061213	-0.430907
a6_13	-0.025042	0.1004095	0.3744596	-0.089886	0.1728636	0.4820146
a6_14	-0.053431	-0.035367	0.0285488	-0.021122	-0.021179	0.0946927
a6_15	0.2767761	0.1690883	0.4663233	0.1266248	0.1690476	0.4299443
a6_16	0.3584397	0.2685846	0.6227672	0.2297797	0.218381	0.7731585
a6_17	0.4543663	0.3877201	0.489421	0.2264661	0.2644676	0.354897
a7_8	-0.749199	-0.663416	-1.219352	-0.558993	-0.451711	-1.232627
a7_9	0.0209295	-0.00195	0.0728406	0.0195807	-0.01394	0.087065
a7_10	-0.491227	-0.448587	-1.012416	-0.377181	-0.396521	-1.051805
a7_11	-0.017924	-0.033782	-0.204968	-0.116331	-0.020978	-0.161719
a7_12	-0.311535	-0.311672	-0.647335	-0.299444	-0.237884	-0.589047
a7_13	-0.201666	-0.360565	-1.04309	-0.92007	-0.43472	-1.023904
a7_14	-0.247864	-0.231889	-0.625035	-0.170342	-0.180646	-0.605789
a7_15	-0.205658	-0.147844	-0.044106	-0.046122	-0.071306	-0.092029
a7_16	0.3078244	0.2897473	0.6875729	0.3256915	0.1936312	0.6282761
a7_17	0.6078971	0.5305111	0.7093344	0.4850248	0.3208664	0.4545635
a8_9	-0.485963	-0.501245	-1.088131	-0.374871	-0.393526	-1.159421
a8_10	0.6955745	0.5013187	0.8779808	0.4384891	0.355301	1.1030894
a8_11	-0.177347	-0.198358	-0.385598	-0.17333	-0.14314	-0.383347
a8_12	0.8739825	0.7400098	1.1874661	0.482815	0.5073367	1.1339815
a8_13	0.2297423	0.2110472	0.4766516	0.1412928	0.1930394	0.5259683

a8_14	-0.026635	-0.033437	-0.196942	0.0110437	-0.076651	-0.336853
a8_15	-0.624042	-0.549603	-1.112303	-0.397777	-0.344492	-1.233649
a8_16	-0.385328	-0.327309	-0.494609	-0.304512	-0.166159	-0.465875
a8_17	-0.779853	-0.897124	-1.115281	-0.794922	-0.514743	-0.540852
a9_10	-0.099377	-0.110635	-0.414535	-0.092405	-0.133052	-0.469476
a9_11	-0.0826	-0.062574	-0.164334	-0.095125	-0.077647	-0.254497
a9_12	-0.337839	-0.350695	-0.520976	-0.367047	-0.192579	-0.509718
a9_13	-0.352557	-0.50255	-1.062336	-0.887623	-0.506793	-1.075077
a9_14	-0.026411	-0.032577	-0.076646	-0.1556	-0.033106	-0.033826
a9_15	0.2973397	0.3489236	0.8634264	0.315469	0.3049563	0.8020987
a9_16	0.0768808	0.0675169	0.1496903	-0.068779	0.0834269	0.3108193
a9_17	0.275646	0.3350094	0.9722943	0.2789943	0.3149316	0.9254798
a10_11	-0.524053	-0.393509	-0.62258	-0.224837	-0.265605	-0.809191
a10_12	1.1309993	0.9452494	1.5547943	0.4729945	0.7395087	1.8380153
a10_13	-0.336833	-0.246223	-0.448599	-0.084078	-0.233767	-0.679277
a10_14	0.3244144	0.2594906	0.2741192	0.1763518	0.1777326	0.3116731
a10_15	-0.626931	-0.489573	-1.268045	-0.223659	-0.496329	-1.747152
a10_16	-0.715101	-0.60662	-1.030766	-0.345587	-0.472767	-1.126271
a10_17	-0.480278	-0.462916	-0.452105	-0.503555	-0.251249	-0.072572
a11_12	-0.387357	-0.392786	-0.841263	-0.249931	-0.296307	-1.097436
a11_13	-0.447103	-0.520121	-1.073733	-1.00013	-0.493044	-0.994735
a11_14	-0.384379	-0.210588	-0.190899	-0.164886	-0.098788	-0.119604
a11_15	0.0098061	-0.052086	-0.007328	-0.066357	-0.008776	0.1198896
a11_16	0.3596998	0.3446954	0.6453058	0.1908695	0.3089287	0.67364
a11_17	0.2627761	0.2134842	0.1653715	0.2596091	0.1025	-0.136077
a12_13	-0.100185	-0.159412	-0.216371	-0.137888	-0.134189	-0.120766
a12_14	0.2475936	0.2167658	0.25578	-0.051291	0.1845116	0.5075986
a12_15	-0.643035	-0.546716	-1.160333	-0.428445	-0.354389	-1.31665
a12_16	-0.622375	-0.581791	-1.213201	-0.42206	-0.468984	-1.27739
a12_17	-0.640832	-0.677288	-0.522768	-0.604638	-0.341206	0.146381
a13_14	-0.5021	-0.369242	-0.54109	-0.23175	-0.265706	-0.670869
a13_15	-0.511378	-0.367454	-0.470216	-0.406189	-0.173312	-0.340059
a13_16	0.5050032	0.4258531	0.7928352	0.2363393	0.3576846	0.8899527
a13_17	0.1260729	0.1343711	-0.094394	0.048486	0.0256037	-0.270259
a14_15	-0.255485	-0.210942	-0.532356	-0.193903	-0.209703	-0.442558
a14_16	-0.275662	-0.259964	-0.405968	-0.26791	-0.156561	-0.342074
a14_17	-0.176247	-0.183912	-0.375573	-0.211011	-0.145146	-0.327494
a15_16	0.6709101	0.6237898	1.3635877	0.389933	0.5247736	1.4304405
a15_17	0.504223	0.4639674	0.6268558	0.5452039	0.2265938	0.1614877
a16_17	0.3602651	0.2247999	0.5506817	0.2210642	0.1770961	0.4677589

Annexe 3-13 : Coefficients des modèles polynomiaux pour les besoins d'énergie finale (L171)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
--	--------	--------	-----	--------	-----------	------------

a0	14.364888	39.443765	61.973108	87.248926	60.929189	107.00728
a1	2.0879991	6.4120772	10.156598	17.339833	9.1214367	14.247272
a2	-0.557695	-0.146076	0.0606901	-1.811272	0.4372555	0.5536566
a3	2.2806398	5.402212	7.6463136	11.200959	7.1863007	11.012109
a4	-0.178816	0.8495401	1.181107	-1.263131	1.7451355	2.340254
a5	-0.363634	-0.414612	-0.540011	0.0895629	-0.61369	-1.099706
a6	1.2787458	2.9195733	4.4894004	7.2214997	4.0313257	5.8932674
a7	-0.120381	1.1083317	2.4521224	5.0278909	1.9825462	2.5348874
a8	1.8540707	3.170672	3.2809107	-0.871405	3.9344427	6.5243139
a9	0.2793401	1.3205003	2.4617778	4.6753468	2.1146808	2.6935964
a10	-1.996207	-2.590663	-3.010214	-6.87943	-2.307895	-2.72548
a11	1.0492981	2.1391798	3.1960073	5.4935573	2.774586	4.4101118
a12	-0.090885	1.177133	1.5275394	-2.234582	2.5659608	3.8870574
a13	0.2515765	0.5393133	0.9082699	1.8223458	0.7815288	0.6981269
a14	0.0087883	0.0921899	0.0802808	-0.383158	0.1895783	0.3565619
a15	2.10704	5.401524	8.8710998	15.045115	7.9110771	12.646369
a16	0.906152	1.9382003	3.0611132	5.1289371	2.7590413	4.7002155
a17	-2.033863	-2.765171	-2.16817	-1.834903	-1.266366	2.2029105
a1_2	-0.993793	-0.655809	-0.377804	-1.894965	-0.03552	-0.540839
a1_3	0.3572932	0.2037477	0.139439	0.1011218	0.136497	0.5511615
a1_4	-0.74489	-0.498403	-0.322062	-0.397141	-0.343677	-1.085259
a1_5	-0.176306	-0.014015	0.0538714	0.0684473	0.0118994	0.4460197
a1_6	0.0446774	0.0261628	0.0014886	-0.205436	0.0797558	0.5940033
a1_7	0.4053507	0.4113369	0.3416359	0.3126972	0.3101157	1.0052448
a1_8	-0.829593	-0.840243	-0.706239	-0.631132	-0.666404	-2.066748
a1_9	0.9275857	0.7160392	0.4815371	0.3137322	0.5268875	1.5445534
a1_10	-1.130159	-0.796927	-0.556613	-0.236073	-0.729942	-2.272389
a1_11	0.4043963	0.2562607	0.1356968	0.0929759	0.158796	0.5073071
a1_12	-0.607008	-0.575315	-0.441434	-0.268626	-0.476461	-1.266502
a1_13	0.2801118	0.2522885	0.173554	0.1341534	0.1539072	0.454089
a1_14	-0.047587	0.0471686	0.1221601	0.3110866	0.0105674	-0.006383
a1_15	1.0900088	0.8877261	0.6529534	0.5414441	0.7234762	1.9773643
a1_16	0.1650537	0.1158851	0.0924327	0.0743968	0.1132897	0.417918
a1_17	0.610307	0.5579973	0.4584675	0.5692471	0.337288	0.5292116
a2_3	-0.027584	-0.029815	-0.060638	-0.132287	-0.023306	0.0027659
a2_4	-0.079692	0.0741221	0.1276462	0.1248557	0.0875171	0.2438784
a2_5	-0.093659	-0.090878	-0.077847	-0.12001	-0.047922	-0.133746
a2_6	-0.112116	-0.04428	-0.026343	-0.105681	-0.013851	-0.013385
a2_7	-0.236971	-0.216736	-0.154982	-0.010554	-0.202738	-0.480388
a2_8	0.6246122	0.4985683	0.314253	0.3326052	0.2876951	0.6740031
a2_9	-0.094069	-0.013665	0.0447113	0.0241808	0.0363123	0.1366828
a2_10	0.579173	0.4519419	0.3513584	0.2180989	0.398881	1.2119786
a2_11	0.0448164	-0.055467	-0.146553	-0.190647	-0.119957	-0.680908
a2_12	0.0122064	0.0944063	0.0709267	-0.005158	0.1263248	0.3186218
a2_13	0.5244299	0.341174	0.2031476	0.1847575	0.225638	0.4314729

a2_14	0.2111252	0.1490461	0.0738131	0.0667754	0.0906607	0.0963985
a2_15	-0.261186	-0.228365	-0.146921	-0.184858	-0.139422	-0.262391
a2_16	-0.199917	-0.262893	-0.250748	-0.292198	-0.187817	-0.662164
a2_17	-0.580371	-0.597476	-0.491568	-0.389209	-0.481408	-0.87134
a3_4	-0.346617	0.3070583	0.5358871	-1.328714	1.0051806	0.7258312
a3_5	-0.451771	-0.269576	-0.093472	0.1206672	-0.22027	-0.424218
a3_6	0.1645541	0.1370625	0.0960272	0.0166462	0.1173444	0.4947005
a3_7	0.2988198	0.2411013	0.1805365	0.1958384	0.1537898	0.4653658
a3_8	-0.307766	-0.373009	-0.384358	-0.329238	-0.37323	-1.304551
a3_9	0.6328271	0.4586529	0.2677596	0.2147369	0.300819	0.6097036
a3_10	-0.730588	-0.556117	-0.466294	-0.424839	-0.469003	-1.273589
a3_11	-0.111075	-0.154736	-0.110398	-0.120319	-0.080986	-0.043021
a3_12	-0.138567	-0.172278	-0.23204	-0.151822	-0.239574	-0.977191
a3_13	0.2399412	0.275259	0.2647474	0.3041109	0.2247954	0.6402552
a3_14	-0.002748	0.0002403	-0.021027	0.0416946	-0.027965	-0.174932
a3_15	0.201057	0.1762742	0.1274113	0.1459195	0.1079746	0.3279113
a3_16	0.2703069	0.2741176	0.2225505	0.2737134	0.1899646	0.5782546
a3_17	0.1159328	0.0283721	0.0252428	0.0867014	0.0039681	-0.004642
a4_5	0.2331772	0.1182151	0.0395083	-0.038687	0.0935771	0.1350097
a4_6	0.4033123	0.3158551	0.2449548	0.1561347	0.3008341	0.8845779
a4_7	-0.616662	-0.442236	-0.29139	-0.459141	-0.224604	-0.253461
a4_8	0.6301848	0.5393991	0.3483146	0.3784002	0.2920248	0.5314261
a4_9	-0.308711	-0.210955	-0.145738	-0.16582	-0.143752	-0.399369
a4_10	0.5701241	0.4215847	0.2944617	0.2236438	0.3309736	0.972205
a4_11	-0.245577	-0.157822	-0.11587	-0.175661	-0.112862	-0.368235
a4_12	0.5421913	0.4923448	0.3095119	0.3538777	0.2772642	0.4415563
a4_13	0.0059529	-0.058125	-0.080525	-0.2547	0.0002778	-0.090408
a4_14	-0.102615	-0.200097	-0.222628	-0.280764	-0.169006	-0.662545
a4_15	-0.458327	-0.364152	-0.22783	-0.294318	-0.208837	-0.723096
a4_16	-0.5299	-0.490992	-0.380512	-0.339038	-0.383246	-1.043794
a4_17	-0.437887	-0.546579	-0.486445	-0.529678	-0.386671	-0.595904
a5_6	0.1974408	0.2052162	0.1377761	0.2071092	0.1096235	0.2531405
a5_7	0.1144724	0.2052449	0.2170356	0.154005	0.1985839	0.5491339
a5_8	0.1482361	-0.002635	-0.05837	-0.044423	-0.034255	-0.300122
a5_9	0.1072077	0.0573048	0.0339689	0.0354152	0.0499579	0.2574346
a5_10	-0.162741	-0.223219	-0.187407	-0.217065	-0.132374	-0.433618
a5_11	-0.373951	-0.208775	-0.115913	-0.135624	-0.125724	-0.198004
a5_12	0.1880185	0.1571339	0.1298074	0.1207344	0.1238321	0.0642655
a5_13	0.1575769	0.1884024	0.1755735	0.16994	0.1596871	0.312719
a5_14	-0.053764	-0.01654	0.0416934	0.0387419	0.0720734	0.416252
a5_15	0.0703765	0.1943376	0.2332105	0.1845734	0.2135086	0.6973309
a5_16	0.0612366	0.2053594	0.2164371	0.1809726	0.1859499	0.5820082
a5_17	-0.101269	-0.053552	-0.027725	0.1426027	-0.099975	-0.29744
a6_7	-0.06831	-0.091732	-0.081885	-0.156952	-0.046813	0.1990341
a6_8	0.1310279	0.0773072	-0.001859	0.0838656	-0.035102	-0.291962

a6_9	0.0276621	0.0339374	0.0443275	-0.070084	0.0816259	0.2789343
a6_10	-0.333381	-0.245878	-0.158335	-0.102477	-0.18785	-0.604165
a6_11	0.0112513	0.0389091	0.0107333	-0.130988	0.086974	0.3397186
a6_12	-0.021643	0.0768242	0.0897918	0.1399779	0.0230466	-0.065704
a6_13	0.3084085	0.2646532	0.1914095	0.2448994	0.1564248	0.4049523
a6_14	0.2263024	0.2491809	0.2576729	0.3154055	0.2319035	0.8366734
a6_15	-0.077739	-0.0236	0.0253691	-0.202053	0.1202325	0.5383294
a6_16	-0.391006	-0.187947	-0.035137	-0.084549	-0.028113	0.1873751
a6_17	-0.022997	-0.002947	0.0404359	0.1387986	-0.00954	-0.092453
a7_8	-0.708476	-0.658025	-0.468526	-0.366018	-0.473905	-1.266041
a7_9	0.273266	0.2342834	0.158227	0.0389598	0.1802975	0.5122416
a7_10	-0.276117	-0.220048	-0.140751	0.0342112	-0.218598	-0.82354
a7_11	0.3391878	0.2671063	0.1957564	0.1837062	0.2196345	0.5720205
a7_12	-0.369698	-0.372601	-0.293743	-0.367171	-0.251797	-0.680292
a7_13	0.0767472	-0.019808	-0.173397	-0.4992	-0.127527	0.1903066
a7_14	-0.214928	-0.176152	-0.121353	-0.215841	-0.088214	-0.290515
a7_15	0.6352008	0.5902394	0.4807743	0.4587324	0.4625937	1.3413799
a7_16	-0.026465	0.023995	0.0341325	0.0103111	0.0307699	0.1281701
a7_17	0.2177753	0.2796059	0.251039	0.2967957	0.1686378	0.1232181
a8_9	-0.281637	-0.15579	-0.064282	-0.115236	-0.046541	-0.237861
a8_10	1.08515	0.9543411	0.7473916	0.9050176	0.6831567	2.1306785
a8_11	-0.346277	-0.25432	-0.185765	-0.235465	-0.170798	-0.438373
a8_12	0.4571169	0.3842689	0.2621176	0.2920023	0.2493266	0.7410295
a8_13	-0.448327	-0.413233	-0.35116	-0.436696	-0.291332	-0.782442
a8_14	-0.099669	-0.070226	-0.048358	-0.096032	-0.035414	0.0436549
a8_15	-0.912517	-0.843473	-0.606827	-0.555364	-0.61913	-2.015691
a8_16	-0.205157	-0.218287	-0.175751	-0.152328	-0.180367	-0.578441
a8_17	-0.648348	-0.720811	-0.568476	-0.696533	-0.400538	-0.260671
a9_10	-0.276912	-0.212575	-0.176496	-0.146892	-0.210506	-0.857769
a9_11	0.1497559	0.0432738	-0.014687	-0.069922	0.0534619	0.2961321
a9_12	-0.030874	-0.169335	-0.190938	-0.063921	-0.22447	-0.823779
a9_13	-0.144042	-0.181624	-0.299662	-0.721875	-0.207071	-0.086294
a9_14	-0.04833	-0.100666	-0.122988	-0.176888	-0.09279	-0.162788
a9_15	0.2579653	0.1839057	0.1091736	0.0066384	0.162091	0.4009164
a9_16	-0.048944	-0.156891	-0.16608	-0.20117	-0.115728	-0.375738
a9_17	0.2772379	0.2212531	0.2147058	0.3024049	0.1470639	0.1273151
a10_11	-0.665177	-0.452283	-0.27456	-0.12338	-0.372946	-0.908018
a10_12	1.1408928	0.9422771	0.6289275	0.4716642	0.7366458	1.9069285
a10_13	-0.151687	-0.175444	-0.174067	-0.120779	-0.198567	-0.741464
a10_14	0.1654767	0.0450286	-0.009598	-0.059039	0.0642703	0.0856789
a10_15	-0.892497	-0.714221	-0.482106	-0.421662	-0.56555	-1.795152
a10_16	-0.292182	-0.191875	-0.14974	-0.103503	-0.184054	-0.678713
a10_17	-0.589722	-0.588512	-0.479218	-0.463159	-0.400402	-0.547272
a11_12	-0.450515	-0.448379	-0.301664	-0.121238	-0.384782	-1.003128
a11_13	-0.412929	-0.367863	-0.400497	-0.631004	-0.405102	-0.547722

a11_14	0.0529296	0.0744717	0.0818368	0.0354816	0.0956638	0.2342852
a11_15	0.4844341	0.2818534	0.1597005	0.1055269	0.229263	0.8801189
a11_16	0.2104322	0.2037049	0.1556106	0.1571567	0.1694238	0.5071001
a11_17	0.4671089	0.3851397	0.261655	0.2938628	0.2072895	0.0055902
a12_13	-0.240748	-0.048462	0.0765306	0.1192303	0.0145736	0.1127224
a12_14	-0.032317	-0.032508	-0.070183	-0.133468	-0.03932	-0.166319
a12_15	-0.642659	-0.492272	-0.259215	-0.211559	-0.318943	-1.132618
a12_16	-0.126965	-0.079055	-0.009703	-0.069685	-0.01156	-0.061017
a12_17	-0.768108	-0.864836	-0.69088	-0.781516	-0.506698	-0.393423
a13_14	0.082963	0.1577884	0.1467714	0.2003199	0.0924597	0.3372201
a13_15	0.0801428	-0.022692	-0.031346	-0.074677	-0.003868	0.1385165
a13_16	-0.138616	-0.085488	-0.02547	0.0285074	-0.054546	-0.179692
a13_17	0.0340121	0.0984064	0.1217362	0.087762	0.0935278	0.249433
a14_15	-0.043061	0.0827985	0.131735	0.1933313	0.0789864	0.4636474
a14_16	-0.327708	-0.231888	-0.146076	0.0290449	-0.216806	-0.539841
a14_17	0.0970511	-0.007457	-0.036104	-0.034404	0.0073884	0.1587573
a15_16	0.0687094	0.1180896	0.1565695	0.0404618	0.1904341	0.7311188
a15_17	0.2263369	0.1879929	0.1886141	0.2585392	0.073697	-0.413868
a16_17	-0.314074	-0.211136	-0.142659	-0.201361	-0.161304	-0.671341
a1_1	0.9430237	0.6508822	0.43579	0.0353543	0.708908	1.4871595
a2_2	1.1227267	1.1254519	0.9221418	1.0022644	0.7085736	1.8567455
a3_3	0.3001269	0.154978	0.0172202	-0.423956	0.2348805	1.2109717
a4_4	0.519428	0.4680278	0.2586993	0.2968224	0.2362761	0.7140614
a5_5	-0.317993	0.0372798	0.0607754	0.1220925	0.0392982	0.7963521
a6_6	0.5483884	0.3424191	0.1857171	-0.238832	0.3937919	0.7901678
a7_7	-0.210319	0.1068833	0.277958	0.383722	0.1594594	0.5117833
a8_8	-0.01432	0.1056341	0.048476	0.4766957	0.0116236	0.4187313
a9_9	-0.331537	-0.133546	0.0190957	-0.011288	0.0166338	-0.221769
a10_10	0.7435422	0.0607007	-0.129049	0.4177314	-0.097733	-0.575926
a11_11	0.0014898	0.2359476	0.3203657	0.2942722	0.2387543	1.0551047
a12_12	0.0117982	-0.183889	-0.591724	-0.113276	-0.678909	-2.090155
a13_13	0.2343438	-0.043449	-0.165411	-0.095059	-0.244889	-1.214937
a14_14	-0.520041	-0.259398	-0.003737	0.317495	-0.166503	0.1007729
a15_15	0.1701541	0.028622	0.0327366	-0.05405	0.136544	0.6323881
a16_16	0.3841123	0.2034656	0.1398009	0.1429306	0.2451256	0.6232171
a17_17	-0.352494	0.013244	0.4253239	0.0820722	0.3418005	-0.690842

Annexe 3-14 : Coefficients des modèles polynomiaux pour le taux d'inconfort thermique d'été (L171)

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
a0	11.76604	15.55966	30.38416	12.13667	44.30446	76.28651
a1	-5.3601	-5.3918	-4.0481	-4.2163	-4.0776	-3.21
a2	2.05367	1.97989	2.61579	2.22612	2.9341	3.09826

a3	-1.2562	-0.8979	-0.4097	-0.7023	-0.6616	-0.763
a4	1.08084	2.32763	2.21059	0.67647	2.10204	1.90593
a5	-0.9979	-1.6233	-2.2581	-0.9063	-2.0695	-1.3024
a6	-0.5532	-1.8713	-1.7494	-0.1655	-1.8371	-1.787
a7	-7.0212	-7.9864	-6.6598	-4.8977	-6.2725	-4.0536
a8	16.99116	23.5731	21.05394	13.45599	1970%	1535%
a9	-2.1664	-0.177	-0.0272	-266.77%	0.08317	-1%
a10	3.96561	6.52551	560.64%	2.29401	518%	349%
a11	0.81345	-0.385	-0.4863	0.54585	-0.918	-0.7708
a12	2.798	4.76248	4.33201	1.68234	4.21853	3.30247
a13	-0.3924	0.45434	-0.4297	-0.7749	-0.6901	-0.5722
a14	0.63703	1.76698	1.56291	-0.0516	1.73258	0.81408
a15	-5.3701	-6.4331	-4.6838	-3.9654	-4.598	-2.868
a16	-3.3815	-3.9927	-2.4851	-1.9181	-2.2163	-1.1746
a17	-11.9662	-14.587	-16.161	-8.7469	-15.3863	-10.4531
a1_2	1.74048	3.33527	3.91441	1.0467	3.85395	3.60199
a1_3	0.99601	-0.3425	-0.2096	1.22031	-0.3309	-0.503
a1_4	0.78374	0.45028	0.27679	-0.1422	0.04044	0.0213
a1_5	0.20237	-0.6858	-0.2914	0.17965	-0.0188	0.48162
a1_6	0.15866	0.56357	0.75059	-0.0381	0.67722	0.12077
a1_7	1.63223	-0.0992	-0.56	1.82807	-0.2566	-0.4769
a1_8	-3.1831	-2.0792	-1.2648	-3.4227	-0.5414	0.14734
a1_9	0.72031	0.71486	0.45664	0.76651	0.07368	-0.6344
a1_10	-0.1938	-3.1588	-2.0281	0.3856	-1.5649	-0.654
a1_11	-0.2709	-0.5911	-0.6403	-0.1009	-0.6798	3%
a1_12	-2.4943	-1.2933	-1.0636	-1.5982	-0.7858	-36%
a1_13	2.7198	1.09624	0.29584	1.87513	-0.446	-0.7713
a1_14	-1.3926	-2.0942	-1.4669	-0.0343	-1.5883	-0.6171
a1_15	1.78789	1.14494	0.65296	1.24815	0.35466	0.06837
a1_16	0.63325	0.53163	0.46558	0.0418	0.46394	0.42008
a1_17	3.3205	2.36567	1.3844	2.6483	0.74865	0.24363
a2_3	0.3308	0.80602	0.55369	-0.0406	0.40386	0.33033
a2_4	-0.818	-2.009	-1.0985	-0.2329	-0.8128	0.0273
a2_5	1.55904	1.33858	0.51318	0.79169	0.39838	0.06733
a2_6	0.82175	0.02562	-0.1068	0.03069	-0.1618	0.05644
a2_7	-0.631	-1.1649	-0.5836	0.14977	-0.3953	-0.1661
a2_8	2.81477	1.65637	0.43081	2.17006	-0.3878	-1.7138
a2_9	-2.27	-1.4036	-0.7658	-1.3693	-0.4977	0.54734
a2_10	-0.3974	-0.3556	-0.3598	-0.2433	-0.3057	-0.4165
a2_11	2.35608	2.11798	1.10591	1.17795	0.77692	0.19901
a2_12	-3.156	-2.0383	-0.3536	-2.3687	0.38704	0.62482
a2_13	0.65932	0.23065	0.09254	0.70568	-0.0542	-0.2855
a2_14	-0.0397	0.64754	0.09038	0.06163	-0.0483	-0.1565
a2_15	-0.8505	-0.514	-0.0861	-0.701	0.06403	0.16052
a2_16	-0.1148	0.32046	0.27197	-0.3578	0.51179	0.26072

a2_17	-1.7878	-1.6444	-0.3471	-0.9433	-0.0962	0.29117
a3_4	3.62284	2.66375	2.49839	2.29975	2.50079	1.87491
a3_5	-1.6156	-2.5662	-1.3615	-0.3635	-0.8824	-0.1051
a3_6	0.39296	0.50263	0.37628	0.39216	0.24282	-0.0121
a3_7	1.47091	0.07007	-0.2285	1.4296	-0.4805	-0.334
a3_8	-0.5	-0.0112	-0.3757	-0.6933	-0.1175	-0.1096
a3_9	2.19905	2.32246	0.96077	1.46992	0.27865	-0.4803
a3_10	-0.9113	1.54612	0.9304	-1.5102	1.31269	0.93059
a3_11	-1.9154	-1.2858	-0.8664	-1.5421	-0.4531	0.26796
a3_12	0.80318	0.30703	-0.3115	0.33404	0.01604	-0.3651
a3_13	-1.2982	-1.653	-0.7824	-0.3962	-0.6825	-0.5433
a3_14	-0.6802	-0.7316	-0.1702	0.01622	-0.0709	-0.2093
a3_15	1.26256	0.50384	0.36551	0.74581	-0.1325	-0.5968
a3_16	0.54058	-1.0028	-0.6219	0.73916	-0.5199	-0.5322
a3_17	2.06598	0.47266	0.01268	1.32196	-0.0551	-0.0691
a4_5	1.70542	0.77241	0.41779	1.04289	0.1473	-0.1471
a4_6	-0.3961	-1.0376	-0.0235	-0.0532	0.41957	-0.0901
a4_7	-1.0098	0.98886	1.22343	-1.5053	1.55394	1.1057
a4_8	0.32146	0.58876	-0.2333	0.2482	-0.5956	-1.0676
a4_9	0.98321	0.7756	0.50626	0.81084	0.18566	-0.3161
a4_10	-0.4559	-0.1229	-0.3279	-0.5764	-0.322	-0.1943
a4_11	1.56266	1.907	1.52516	0.70437	0.97017	-0.031
a4_12	0.41975	0.10843	-0.6633	0.51093	-0.7196	-0.8269
a4_13	1.44721	2.47379	1.77596	-0.1843	1.26551	0.42965
a4_14	-0.3293	1.78086	1.46207	-1.015	1.28535	0.96848
a4_15	0.33444	0.44133	0.69329	-0.1153	0.78678	0.5158
a4_16	-0.3054	-0.8984	-0.2295	-0.559	-0.0512	0.1465
a4_17	0.46886	0.23188	0.74955	-0.2372	0.73389	0.45175
a5_6	1.10981	-0.1244	-0.8941	1.26223	-0.812	-0.7932
a5_7	2.242	1.12765	0.27078	1.45857	-0.0466	-0.092
a5_8	-0.5697	-0.092	0.58951	-0.7904	0.99748	0.71385
a5_9	0.98082	0.48015	0.22855	0.77999	0.0042772	-0.161
a5_10	0.13407	-0.1288	-0.0991	-0.2196	-0.1105	0.34965
a5_11	-1.9993	-1.731	-0.7305	-1.2451	-0.0202	0.31924
a5_12	-0.2018	0.07349	0.2918	-0.1434	0.28649	-0.1996
a5_13	0.27773	0.52473	0.12096	0.24166	0.15733	0.29982
a5_14	-1.8341	-1.1854	-0.6281	-1.4578	-0.0551	-0.0638
a5_15	0.19176	0.49851	0.62438	0.14489	0.48255	0.36683
a5_16	0.19942	0.88363	0.38618	0.12626	0.42149	-0.1125
a5_17	2.47446	0.56865	-0.3438	2.07389	-0.8195	-0.4506
a6_7	1.32443	0.6926	0.234	1.04886	0.23545	0.45635
a6_8	0.3031	-1.3383	-1.4024	0.38085	-1.7249	-1.2902
a6_9	0.11315	0.69293	0.95944	-0.3878	0.78601	0.47088
a6_10	-0.2087	1.05146	0.12152	-0.6231	-0.0286	0.26567
a6_11	-0.4393	0.35229	0.53707	-0.5327	0.65342	0.26738

a6_12	-0.1417	-1.2485	-0.9288	0.38472	-0.7363	-0.3916
a6_13	0.32241	-0.2246	-0.0022	0.55639	-0.0824	-0.7093
a6_14	-1.6399	-2.0528	-1.137	-0.379	-0.6431	-0.2695
a6_15	-0.3994	1.89766	1.8196	-0.8221	1.76237	0.83918
a6_16	-1.9269	-1.1536	-0.714	-1.2497	-0.2186	0.54083
a6_17	-0.7898	-0.7513	-0.0282	0.35782	-0.1283	0.19759
a7_8	-4.6443	-2.9709	-1.2081	-3.9274	-0.3083	1.11184
a7_9	2.50517	2.06043	1.34147	1.57905	0.94423	0.20467
a7_10	-0.3987	-1.6107	-0.8039	0.1869	-0.6792	-0.0797
a7_11	-0.2256	-0.2592	-0.1464	-0.0678	-0.1938	-0.0503
a7_12	-0.458	0.27319	0.76692	-0.9006	1.14646	0.71475
a7_13	0.8761	0.30613	0.50795	0.81359	0.29611	0.33182
a7_14	-0.2525	0.61038	0.80473	-0.3172	1.05838	1.17329
a7_15	3.0054	0.90909	0.23401	2.74425	-0.4218	-0.8162
a7_16	0.83613	0.85245	0.50387	0.33662	0.55971	0.05589
a7_17	3.27876	1.93254	1.75789	2.75058	1.22338	-0.2606
a8_9	-1.2281	-0.5315	0.14431	-1.3548	0.47192	0.22741
a8_10	1.27961	-0.9515	-1.878	2.16048	-2.5082	-2.5302
a8_11	-0.1065	-0.039	0.46048	-0.3224	0.64941	0.58547
a8_12	0.376	0.22759	-0.2225	0.3698	-0.5262	-1.3169
a8_13	0.72078	0.84899	1.20699	-0.6046	1.12674	0.75937
a8_14	0.25042	0.36358	-0.0565	-0.1586	-0.0321	0.04254
a8_15	-4.7381	-2.2809	-0.4026	-3.9066	0.15961	0.34049
a8_16	-0.9585	-0.9868	-0.5081	-0.7051	-0.2795	-0.0518
a8_17	-7.5218	-5.604	-1.5823	-6.3315	0.71664	3.56142
a9_10	0.65256	0.97199	1.34796	0.13172	0.9436	0.08677
a9_11	-0.0577	-0.051	-0.093	-0.2371	0.16289	0.04295
a9_12	1.86388	0.17939	-0.1762	1.56354	-0.5343	-1.0142
a9_13	0.08031	0.56433	0.78108	-0.2507	0.77092	0.36556
a9_14	-0.5918	-0.0984	0.06659	-0.387	0.17452	0.34038
a9_15	1.77468	1.50707	0.81832	1.04089	0.61736	0.04742
a9_16	-0.2417	-0.9214	0.01466	-0.3038	0.41978	0.28226
a9_17	-0.7873	-0.6018	-0.021	-0.0724	-0.3917	-0.099
a10_11	-0.933	-1.3208	-0.6941	-0.5106	-0.2805	-0.0245
a10_12	0.88441	1.63784	0.75204	0.39981	0.62685	-0.0864
a10_13	-0.5813	0.34217	0.40543	-0.2085	0.22216	-0.2103
a10_14	0.35931	0.90563	0.50229	-0.1993	0.59531	0.34653
a10_15	-1.6613	-0.2182	0.12662	-1.2344	0.44298	0.45044
a10_16	0.09716	0.16627	-0.1281	0.1748	-0.2467	-0.0945
a10_17	-2.774	-2.1144	-0.8869	-1.7785	-0.1864	0.8083
a11_12	-0.2528	-0.7396	-1.0103	0.15329	-1.1281	-0.2969
a11_13	-0.6177	-2.1236	-0.8389	0.21272	-0.8036	-0.4577
a11_14	-2.2546	-0.1246	0.12849	-1.3292	0.20902	0.1754
a11_15	-2.0719	-0.8029	-0.3047	-1.2911	0.15522	0.46769
a11_16	0.51205	-0.4721	-0.3318	0.46894	-0.3192	-0.3354

a11_17	1.52961	1.30547	0.71789	1.14374	0.27361	-0.5685
a12_13	-0.0544	-1.8806	-1.1739	0.42653	-0.8206	-0.5485
a12_14	0.39836	1.60156	1.3264	-0.4008	1.05019	0.19806
a12_15	-1.2073	-0.7411	-0.7124	-0.8752	-0.3841	-0.2081
a12_16	-0.4991	-0.7567	-0.3036	-0.2669	-0.1002	0.02484
a12_17	-2.9551	-1.0033	-0.6052	-2.8747	0.42366	0.83596
a13_14	-1.0853	-1.8621	-1.1226	-0.1509	-1.0885	-0.7258
a13_15	0.65582	0.85046	0.8521	0.44385	0.40266	0.13639
a13_16	-0.0732	-0.6552	-0.6917	0.11522	-0.6127	-0.2916
a13_17	-0.1823	0.38469	0.21546	-0.0618	-0.0209	0.0572
a14_15	-2.243	-2.9282	-1.5821	-0.7135	-1.218	-0.3945
a14_16	-3.4363	-2.2334	-1.4552	-1.9408	-0.7483	-0.2912
a14_17	-0.6716	0.47813	0.27616	-0.3893	0.26992	-0.1963
a15_16	-0.2595	0.54515	0.59623	-0.6123	0.61406	0.66757
a15_17	4.66537	297.65%	1.93368	3.58625	1.40909	0.51118
a16_17	1.16644	1.10672	1.21055	0.34748	1.14619	0.93571
a1_1	1.74698	5.1814	4.8767	-0.3043	4.49392	1.18813
a2_2	4.73677	-0.002761	0.55315	4.42684	-0.3901	-1.9586
a3_3	-8.7456	0.99072	1.6641	-7.2293	2.63588	1.1932
a4_4	-3.6948	-3.5414	-0.3884	-2.27	0.99782	1.0539
a5_5	2.93737	2.169	-0.4242	2.01051	-1.2176	-0.6632
a6_6	-0.1628	2.44377	2.57944	-0.9094	2.69406	2.18676
a7_7	-1.0727	2.27889	3.80282	-1.233	1.57911	0.30116
a8_8	-3.5272	0.80127	-0.0696	-3.339	-0.1865	-2.6992
a9_9	9.3995	9.19015	4.18939	4.83541	1.77512	-0.7495
a10_10	2.73721	0.40779	-1.2825	1.79606	-1.3437	-1.3738
a11_11	-0.7511	-0.2508	1.01858	-1.2054	0.08167	-0.7364
a12_12	3.79759	1.73802	0.33492	2.38819	0.45129	-0.4191
a13_13	4.67136	3.50284	2.33182	3.77557	1.74233	0.07785
a14_14	-2.329	-8.1078	-4.746	0.52416	-4.2823	-1.1575
a15_15	3.20232	1.36877	-1.9176	2.06582	-2.4651	-1.9216
a16_16	-2.8572	-4.109	-2.3773	-0.838	-1.8618	0.22574
a17_17	1.2568	7.33923	6.93726	-0.1658	7.26181	3.59714



## Référence

ADEME, 2009. *Construire et mettre en œuvre un plan climat-énergie territorial*. Disponible à l'adresse : <http://www.pcet-ademe.fr/sites/default/files/Le%20guide%20pcet.pdf>.

ADEREE, 2011. *Les éléments techniques du projet de la réglementation thermique du bâtiment au Maroc*.

ADEREE, 2014a. *Décret n° 2-13-874*. 6 novembre 2014. Disponible à l'adresse : <http://www.aderee.ma/index.php/fr/espace-presse/327-14-novembre-2013-adoption-du-decret-relatif-a-la-reglementation-thermique-des-batiments>.

ADEREE, 2014b. *Guide technique pour le chauffage, la ventilation et la climatisation*.

ADEREE, 2014c. *Règlement Thermique de Construction au Maroc - Version simplifiée*. Maroc.

ADEREE, 2015a. *Manuel technique de l'éclairage*. Disponible à l'adresse : Manuel technique de l'éclairage.

ADEREE, 2015b. *Règlement thermique de Construction au maroc*.

AFE, 2013. *La transition éclairagiste, une chance pour la France*. Disponible à l'adresse : [http://www.afe-eclairage.com.fr/docs/2014/10/06/10-06-14-9-15-Transition\\_eclairagiste\\_une\\_chance\\_pour\\_la\\_France\\_JNL2014.pdf](http://www.afe-eclairage.com.fr/docs/2014/10/06/10-06-14-9-15-Transition_eclairagiste_une_chance_pour_la_France_JNL2014.pdf).

AKBARI, Hashem et MATTHEWS, H. Damon, 2012. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. In : *Energy and Buildings*. décembre 2012. Vol. 55, p. 2-6. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.02.055.

ALANNE, Kari, 2004. Selection of renovation actions using multi-criteria « knapsack » model. In : *Automation in Construction*. mai 2004. Vol. 13, n° 3, p. 377-391. DOI 10.1016/j.autcon.2003.12.004.

ALANNE, Kari, SALO, Ahti, SAARI, Arto et GUSTAFSSON, Stig-Inge, 2007. Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems. In : *Energy and Buildings*. décembre 2007. Vol. 39, n° 12, p. 1218-1226. DOI 10.1016/j.enbuild.2007.01.009.

ALLARD, Francis, 1998. *Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook*. Earthscan. ISBN 978-1-873936-72-6.

ALPUCHE, María G., GONZÁLEZ, Ileana, OCHOA, José M., MARINCIC, Irene, DUARTE, Alejandro et VALDENEBRO, Esai, 2014. Influence of Absorptance in the Building Envelope of Affordable Housing in Warm Dry Climates. In : *Energy Procedia*. 2014. Vol. 57, p. 1842-1850. DOI 10.1016/j.egypro.2014.10.048.

AMET, Pierre, GOURDON, G., GUERN, Y., JULES, R., MARGUET, E. et MYKIETA, F., 2010. *Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire*. 2e édition. Paris : Eyrolles. ISBN 978-2-212-12857-4.

ANME, 2008. *Arrêté du 23 juillet 2008 pour les constructions à usage de bureau*. 2008. Disponible à l'adresse : <http://www.anme.nat.tn/index.php?id=121>.

ANME, 2009. *Arrêté 1er juin 2009 pour les bâtiments à usage résidentiel*. 2009. Disponible à l'adresse : <http://www.anme.nat.tn/index.php?id=121>.

ANON., 2013. *Interconnection Consulting: market research, study, industry information*. 2013. Disponible à l'adresse : <http://www.interconnectionconsulting.com/index.php?lang=en&presse=28>.

ASADI, Ehsan, DA SILVA, Manuel Gameiro, ANTUNES, Carlos Henggeler et DIAS, Luís, 2012. Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. In : *Energy and Buildings*. janvier 2012. Vol. 44, p. 81-87. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.10.016.

ASTE, Niccolò, ANGELOTTI, Adriana et BUZZETTI, Michela, 2009. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. In : *Energy and Buildings*. novembre 2009. Vol. 41, n° 11, p. 1181-1187. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.06.005.

BELLIA, Laura, DE FALCO, Francesco et MINICHIELLO, Francesco, 2013. Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates. In : *Applied Thermal Engineering*. 14 mai 2013. Vol. 54, n° 1, p. 190-201. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2013.01.039.

BIRD-IDA, 2015. *Données de La Banque mondiale* [en ligne]. 2015. Disponible à l'adresse : <http://donnees.banquemondiale.org/>.

BLONDEAU, P, SPÉRANDIO, M et ALLARD, F, 2002. Multicriteria analysis of ventilation in summer period. In : *Building and Environment*. février 2002. Vol. 37, n° 2, p. 165-176. DOI 10.1016/S0360-1323(01)00017-8.

BOUHES, Hassan, HAMDY, Hassan, BENHAMOU, Brahim, BENNOUNA, Amin, HOLLMULLER, Pierre et LIMAM, Karim, 2013. Dynamic simulation of an earth-to-air heat exchanger connected to a villa type house in Marrakech. 2013. Disponible à l'adresse : <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:37018/ATTACHMENT01>.

BPIE, 2011. Disponible à l'adresse : [http://www.bpie.eu/eu\\_buildings\\_under\\_microscope.html#.VKg\\_rsmKL0w](http://www.bpie.eu/eu_buildings_under_microscope.html#.VKg_rsmKL0w).

BRANS, J. P. et VINCKE, Ph., 1985. Note—A Preference Ranking Organisation Method. In : *Management Science*. 1 juin 1985. Vol. 31, n° 6, p. 647-656. DOI 10.1287/mnsc.31.6.647.

CATALINA, Tiberiu, 2009. *Estimation of residential buildings energy consumptions and analysis of renewable energy systems using a multi-criteria decision methodology* [en ligne].

S.l. : PhD Thesis, Insa-Lyon, France. Disponible à l'adresse : <http://www.opengrey.eu/item/display/10068/847038>.

CEREN, 2014. *Données statistiques du CEREN*.

CHANG, Mei-Chih et SHIH, Shen-Guan, 2015. A Hybrid Approach of Dynamic Programming and Genetic Algorithm for Multi-criteria Optimization on Sustainable Architecture design. In : *Computer-Aided Design and Applications*. 4 mai 2015. Vol. 12, n° 3, p. 310-319. DOI 10.1080/16864360.2014.981460.

CHLELA, Fadi, 2008. *Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie*. Université de La Rochelle. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00271813>.

CHLELA, F., HUSAUNNDEE, A., RIEDERER, P. et INARD, Christian, 2007. Numerical evaluation of earth to air heat exchangers and heat recovery ventilation systems. In : *International Journal of Ventilation*. 2007. Vol. 6, n° 1, p. 31-42.

CITEPA, 2014. *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France*. Disponible à l'adresse : <http://www.citepa.org/fr/>.

CLARKE, Joe, 2001. *Energy Simulation in Building Design*. Oxford : Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-7506-5082-3. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750650823500000>.

CLARKE, Joe A., 2001. *Energy simulation in building design*. Routledge. Disponible à l'adresse : [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=WH0VCiF8jkoC&oi=fnd&pg=PR3&dq=Energy+Simulation++in++Building+Design+&ots=c8Zyd5Cery&sig=6C0fEb-3QT9DMFF6Lhcqt\\_MtJ94](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=WH0VCiF8jkoC&oi=fnd&pg=PR3&dq=Energy+Simulation++in++Building+Design+&ots=c8Zyd5Cery&sig=6C0fEb-3QT9DMFF6Lhcqt_MtJ94).

COLLETTE, Yann et SIARRY, Patrick, 2011. *Optimisation multiobjectif: Algorithmes*. Editions Eyrolles. ISBN 978-2-212-16752-8.

CTE, 2013. *Documento Básico HE Ahorro de Energía*. septembre 2013. Disponible à l'adresse : [http://www.codigotecnico.org/cte/export/sites/default/web/galerias/archivos/documentosCTE/DB\\_HE/DBHE-2013-11-08.pdf](http://www.codigotecnico.org/cte/export/sites/default/web/galerias/archivos/documentosCTE/DB_HE/DBHE-2013-11-08.pdf).

CUCE, Erdem et RIFFAT, Saffa B., 2015. A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. janvier 2015. Vol. 41, p. 695-714. DOI 10.1016/j.rser.2014.08.084.

CYPE, 2015. CYPE. Software pour l'Architecture et l'Ingénierie de la Construction. Disponible à l'adresse : <http://www.cype.fr/>.

D'CRUZ, Neville A. et RADFORD, Antony D., 1987. A multicriteria model for building performance and design. In : *Building and Environment*. 1987. Vol. 22, n° 3, p. 167-179. DOI 10.1016/0360-1323(87)90005-9.

DEAN, Angela, MORRIS, Max, STUFKEN, John et BINGHAM, Derek, 2015. *Handbook of Design and Analysis of Experiments*. CRC Press. ISBN 978-1-4665-0434-9.

DEB, Kalyanmoy, 2001. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-87339-6.

DE DEAR, R., 2004. Thermal comfort in practice. In : *Indoor Air*. 1 août 2004. Vol. 14, p. 32-39. DOI 10.1111/j.1600-0668.2004.00270.x.

DESMONS, Jean, 2014. *Aide-mémoire de génie climatique - 3e édition*. 3e édition. Paris : Dunod. ISBN 978-2-10-071549-7.

DIAKAKI, Christina, GRIGOROUDIS, Evangelos et KOLOKOTSA, Dionyssia, 2008. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. In : *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40, n° 9, p. 1747-1754. DOI 10.1016/j.enbuild.2008.03.002.

DMN, 2011. *Zonage climatique du Maroc destiné à la réglementation de thermique du bâtiment*. 2011.

DODGE, Yadolah, 2004. *Optimisation appliquée*. Springer Science & Business Media. ISBN 978-2-287-21335-9.

DODOO, Ambrose, GUSTAVSSON, Leif et SATHRE, Roger, 2014. Lifecycle primary energy analysis of low-energy timber building systems for multi-storey residential buildings. In : *Energy and Buildings*. octobre 2014. Vol. 81, p. 84-97. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.06.003.

DPEB, 2010. *Directive 2010/31/UE du parlement européen et du conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments*. 2010. Disponible à l'adresse : <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012L0027>.

D.T.R. C 3-2, 1997. *Règles de calcul des déperditions calorifiques*.

D.T.R. C 3-4, 1997. *Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments*.

EDENHOFER, O, R, Pichs-Madruga, Y, Sokona, E, Farahani, S, Kadner, K, Seyboth, A, Adler, I, Baum, BRUNNER, S., EICKEMEIER, P., KRIEMANN, B., SAVOLAINEN, J., SCHLÖMER, S., STECHOW, C. von, ZWICKEL, T. et MINX, J.C., 2014. *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Cambridge University Press.

EFFINERGIE, 2013. *Règles techniques applicables aux bâtiments faisant l'objet d'une demande de label Bepos-effinergie 2013*. Disponible à l'adresse : <http://www.effinergie.org/index.php/les-labels-effinergie/bepos-effinergie>.

EFFINERGIE, 2014. *Règles techniques applicables aux bâtiments neufs faisant l'objet d'une demande de label effinergie+*. Disponible à l'adresse : <http://www.effinergie.org/index.php/les-labels-effinergie/le-label-effinergie->.

- EL ANDALOUSSI, El Habib, 2010. *Infrastructures et développement énergétique durable en Méditerranée : perspectives 2025*.
- EMMERICH, Steven J., POLIDORO, Brian et AXLEY, James W., 2011. Impact of adaptive thermal comfort on climatic suitability of natural ventilation in office buildings. In : *Energy and Buildings*. septembre 2011. Vol. 43, n° 9, p. 2101-2107. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.04.016.
- ENEA, 2005. *Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192*. Disponible à l'adresse : <http://efficienzaenergetica.acs.enea.it/>.
- ENEA, 2011. *Decreto legislativo 3 marzo 2011 , n. 28*. Disponible à l'adresse : [http://www.acs.enea.it/doc/dlgs\\_28-2011.pdf](http://www.acs.enea.it/doc/dlgs_28-2011.pdf).
- FANGER, P. O., 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. In : . 1970. p. 244 pp. CABDirect2
- FILFLI, Sila, 2006. *Optimisation bâtiment/système pour minimiser les consommations dues à la climatisation*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Disponible à l'adresse : <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002199>.
- GARBAY, Bastien, 2011. *Présentation des différentes méthodes de détermination de l'efficacité d'un échangeur double flux*. Disponible à l'adresse : <http://www.enertech.fr/pdf/46/methodes-determination-efficacite-echangeur-double-flux.pdf>.
- GE, Hua, MCCLUNG, Victoria Ruth et ZHANG, Shenshu, 2013. Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study. In : *Energy and Buildings*. mai 2013. Vol. 60, p. 163-173. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.01.004.
- GHIAUS, Cristian et ALLARD, Francis, 2006. Potential for free-cooling by ventilation. In : *Solar Energy*. avril 2006. Vol. 80, n° 4, p. 402-413. DOI 10.1016/j.solener.2005.05.019.
- GLORANT, François, TITTELEIN, Pierre, JOULIN, Annabelle et LASSUE, Stéphane, 2015. Modeling a triple-glazed supply-air window. In : *Building and Environment*. janvier 2015. Vol. 84, p. 1-9. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.10.017.
- GOH, C. j, 2002. *Duality in Optimization and Variational Inequalities*. London : CRC Press. ISBN 978-0-415-27479-1.
- GONÇALVES, Pedro, GASPAR, Adélio Rodrigues et SILVA, Manuel Gameiro da, 2012. Energy and exergy-based indicators for the energy performance assessment of a hotel building. In : *Energy and Buildings*. septembre 2012. Vol. 52, p. 181-188. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.06.011.
- GONZALO, Roberto et HABERMANN, Karl J., 2008. *Architecture et efficacité énergétique*. Basel; Boston : Birkhäuser. ISBN 978-3-7643-8451-7.
- GOUPY, Jacques, 2013. *Introduction aux plans d'expériences: avec applications*. Paris : "l'Usine nouvelle" : Dunod. ISBN 978-2-10-059296-8.

GRYNNING, Steinar, TIME, Berit et MATUSIAK, Barbara, 2014. Solar shading control strategies in cold climates – Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces. In : *Solar Energy*. septembre 2014. Vol. 107, p. 182-194. DOI 10.1016/j.solener.2014.06.007.

GSCF, 2015. Triste Noël : Cinq enfants morts de froid. In : *GSCF*. Disponible à l'adresse : [http://www.gscf.fr/Triste-Noel-Cinq-enfants-morts-de-froid\\_a1373.html](http://www.gscf.fr/Triste-Noel-Cinq-enfants-morts-de-froid_a1373.html).

GUSTAVSEN, Arild, GRYNNING, Steinar, ARASTEH, Dariush, JELLE, Bjørn Petter et GOUDEY, Howdy, 2011. Key elements of and material performance targets for highly insulating window frames. In : *Energy and Buildings*. octobre 2011. Vol. 43, n° 10, p. 2583-2594. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.05.010.

HAUT, Paul de, 2011. *Chauffage, isolation et ventilation écologiques*. 2e édition. Paris : Eyrolles. ISBN 978-2-212-12998-4.

HEMKER, Thomas, FOWLER, Kathleen R., FARTHING, Matthew W. et STRYK, Oskar von, 2008. A mixed-integer simulation-based optimization approach with surrogate functions in water resources management. In : *Optimization and Engineering*. 1 décembre 2008. Vol. 9, n° 4, p. 341-360. DOI 10.1007/s11081-008-9048-0.

IEA, 2012. *World energy outlook 2012*. Disponible à l'adresse : <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2012/>.

IEA, 2014. Key World Energy Statistics 2014. Disponible à l'adresse : <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2014.html>.

INIES, 2015. Base de données Inies. In : *Base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages*. Disponible à l'adresse : <http://www.base-inies.fr/Inies/default.aspx>.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Conséquences, Adaptation et Vulnérabilité* [en ligne]. 2014. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_french.shtml](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml).

JAFFAL, Issa, 2009. *Vers une conception rationnelle des bâtiments à basse consommation d'énergie : méthodologie d'évaluation des performances thermiques*. La Rochelle.

JAOUHARI, S, JELAIDI, M et NASSIR EL HAK, R, 2013. *Tendances de l'efficacité énergétique au MAROC*. Disponible à l'adresse : <http://medener-indicateurs.net/fr/>.

JELLE, Bjørn Petter, HYND, Andrew, GUSTAVSEN, Arild, ARASTEH, Dariush, GOUDEY, Howdy et HART, Robert, 2012. Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. In : *Solar Energy Materials and Solar Cells*. janvier 2012. Vol. 96, p. 1-28. DOI 10.1016/j.solmat.2011.08.010.

JI, Yingchun, LOMAS, Kevin J. et COOK, Malcolm J., 2009. Hybrid ventilation for low energy building design in south China. In : *Building and Environment*. novembre 2009. Vol. 44, n° 11, p. 2245-2255. DOI 10.1016/j.buildenv.2009.02.015.

JOKISALO, Juha, KURNITSKI, Jarek, KORPI, Minna, KALAMEES, Targo et VINHA, Juha, 2009. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. In : *Building and Environment*. février 2009. Vol. 44, n° 2, p. 377-387. DOI 10.1016/j.buildenv.2008.03.014.

JUODIS, Egidijus, 2006. Extracted ventilation air heat recovery efficiency as a function of a building's thermal properties. In : *Energy and Buildings*. juin 2006. Vol. 38, n° 6, p. 568-573. DOI 10.1016/j.enbuild.2005.07.002.

KOFFI, Juslin Kouadio, 2009. *Analyse multicritères des stratégies de ventilation en maisons individuelles*. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2009LAROS273>.

LABOURET, Anne, CUMUNEL, Pascal, BRAUN, Jean-Paul et FARAGGI, Benjamin, 2010. *Cellules solaires - 5ème édition - Les bases de l'énergie photovoltaïque*. 5e édition. Paris : Dunod. ISBN 978-2-10-054566-7.

LAPISA, Remon, BOZONNET, Emmanuel, ABADIE, Marc Olivier et SALAGNAC, Patrick, 2013. Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact. In : *Advances in Building Energy Research*. 2013. Vol. 7, n° 2, p. 192-208. DOI 10.1080/17512549.2013.865559.

LE FIGARO, 2012. Un bébé meurt de froid au Maroc. In : *Le Figaro*. Disponible à l'adresse : <http://www.lefigaro.fr/flash-actu/2012/12/25/97001-20121225FILWWW00002-maroc-un-bebe-meurt-de-froid-dans-l-atlas.php>.

LEGIFRANCE, 2005. *Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique*. 2005.

LEGIFRANCE, 2007. *Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants*. Disponible à l'adresse : [http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2005/pdf/arrete\\_3\\_mai\\_2007\\_R131-28.pdf](http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2005/pdf/arrete_3_mai_2007_R131-28.pdf).

LEGIFRANCE, 2008. *Arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1 000 mètres carrés, lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants*. Disponible à l'adresse : [http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT\\_existant/globale/arrete\\_13\\_juin\\_2008.pdf](http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT_existant/globale/arrete_13_juin_2008.pdf).

LEGIFRANCE, 2009a. *Arrêté du 29 septembre 2009 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique rénovation »*. 2009.

LEGIFRANCE, 2009b. *Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*. 3 août 2009.

LEGIFRANCE, 2012. *Réglementation Thermique*. 2012.

LIÉBARD, Alain et HERDE, André De, 2006. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris : Le Moniteur Éditions. ISBN 978-2-281-19290-2.

L'OFFICE PUBLIC DE L'HABITAT DE L'AGGLOMÉRATION DE LA ROCHELLE, 2013. *PROGRAMME DE REHABILITATION Bâtiment 6 – Port Neuf*. juin 2013.

MAES, Pascale, 2009. *Labels d'efficacité énergétique : HQE, BBC-Effinergie, Maison Passive, RT 2005/2012, Qualitel*. Paris : Eyrolles. ISBN 978-2-212-12644-0.

MALATJI, Esrom Mahlatsi, ZHANG, Jiangfeng et XIA, Xiaohua, 2013. A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision. In : *Energy and Buildings*. juin 2013. Vol. 61, p. 81-87. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.01.042.

MARDIANA-IDAYU, A. et RIFFAT, S. B., 2012. Review on heat recovery technologies for building applications. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. février 2012. Vol. 16, n° 2, p. 1241-1255. DOI 10.1016/j.rser.2011.09.026.

MARTINAITIS, V, ROGOŽA, A et BIKMANIEN, I, 2004. Criterion to evaluate the « twofold benefit » of the renovation of buildings and their elements. In : *Energy and Buildings*. janvier 2004. Vol. 36, n° 1, p. 3-8. DOI 10.1016/S0378-7788(03)00054-9.

MARTINELLI, Letizia, BATTISTI, Alessandra et MATZARAKIS, Andreas, 2015. Multicriteria analysis model for urban open space renovation: An application for Rome. In : *Sustainable Cities and Society*. février 2015. Vol. 14, p. e10-e20. DOI 10.1016/j.scs.2014.07.002.

MAVROTAS, George, DIAKOULAKI, Danae, FLORIOS, Kostas et GEORGIOU, Paraskevas, 2008. A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens. In : *Energy Policy*. juillet 2008. Vol. 36, n° 7, p. 2415-2429. DOI 10.1016/j.enpol.2008.01.011.

MAYSTRE, Lucien Yves, PICTET, Jacques et SIMOS, Jean, 1994. *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. S.l. : PPUR presses polytechniques. ISBN 978-2-88074-267-6.

MEIER, Alan K., 1984. The cost of conserved energy as an investment statistic. Disponible à l'adresse : <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/94751>.

MEM, 2012. *Secteur de l'énergie, Chiffres clés*. Disponible à l'adresse : <http://www.mem.gov.ma/SitePages/Default.aspx>.

MINERGIE, 2015. Minergie. Disponible à l'adresse : <http://www.minergie.ch/>.

MITCHELL, R. G. Bruce, 1982. PVC Window Manufacture. In : WHELAN, A. et DUNNING, D. J. (éd.), *Developments in Plastics Technology—1*. Springer Netherlands. The Developments Series. p. 155-194. ISBN 978-94-009-6624-6. Disponible à l'adresse : [http://link.springer.com/gutenberg.univ-lr.fr/chapter/10.1007/978-94-009-6622-2\\_4](http://link.springer.com/gutenberg.univ-lr.fr/chapter/10.1007/978-94-009-6622-2_4).

MORAN, Michael J., 1990. *Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use*. Revised edition edition. New York : Amer Society of Mechanical. ISBN 978-0-7918-0009-6.

- MURRAY, Sean N., WALSH, Brendan P., KELLIHER, Denis et O’SULLIVAN, D. T. J., 2014. Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms – A case study. In : *Building and Environment*. mai 2014. Vol. 75, p. 98-107. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.01.011.
- NABINGER, Steven et PERSILY, Andrew, 2011. Impacts of airtightening retrofits on ventilation rates and energy consumption in a manufactured home. In : *Energy and Buildings*. novembre 2011. Vol. 43, n° 11, p. 3059-3067. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.07.027.
- NELDER, J. A. et MEAD, R., 1965. A Simplex Method for Function Minimization. In : *The Computer Journal*. 1 janvier 1965. Vol. 7, n° 4, p. 308-313. DOI 10.1093/comjnl/7.4.308.
- NGUYEN, Anh-Tuan, REITER, Sigrid et RIGO, Philippe, 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. In : *Applied Energy*. janvier 2014. Vol. 113, p. 1043-1058. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- NICOL, J. Fergus, 2011. Adaptive comfort. In : *Building Research & Information*. 1 avril 2011. Vol. 39, n° 2, p. 105-107. DOI 10.1080/09613218.2011.558690.
- OLIVEIRA, Gregory De, 2013. *Approche hybride d’optimisation pour la gestion d’énergie dans le bâtiment*. phdthesis. Université de Grenoble. Disponible à l’adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00934755/document>.
- OME, 2008. *Mediterranean Energy Perspectives*. Disponible à l’adresse : <http://www.ome.org/home.html>.
- OPEN, 2014. *Résultats 2013*. Disponible à l’adresse : <http://www.ademe.fr/open-observatoire-permanent-lamelioration-energetique-logement-campagne-2014-resultats-2013>.
- ORME, Malcolm, LIDDAMENT, Martin W. et WILSON, Andrew, 1998. *Numerical Data for Air Infiltration and Natural Ventilation Calculations*. Air Infiltration and Ventilation Centre.
- PASSIVHAUS, 2015. PASSIVHAUS. Disponible à l’adresse : <http://www.passivhaus.fr/>.
- PATRY, Pierre-Manuel et MOLLE, Dimitri, 2013. *RT 2012 et RT existant : Réglementation thermique et efficacité énergétique*. Édition : 2e édition. Paris : Eyrolles. ISBN 978-2-212-13655-5.
- PLAN BLEU - CENTRE D’ACTIVITÉS RÉGIONALES PNUE/PAM, 2011. *Energie, changement climatique et bâtiment en Méditerranée : perspectives régionales*.
- RECCHIA, Lucia, BONCINELLI, Paolo, CINI, Enrico, VIERI, Marco, PEGNA, Francesco Garbati et SARRI, Daniele, 2011. General Theory of Multicriteria Analysis and Life Cycle Assessment. In : *Multicriteria Analysis and LCA Techniques*. Springer London. Green Energy and Technology. p. 5-26. ISBN 978-0-85729-703-7. Disponible à l’adresse : [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-85729-704-4\\_2](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-85729-704-4_2).

REY, Emmanuel, 2004. Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue. In : *Energy and Buildings*. avril 2004. Vol. 36, n° 4, p. 367-372. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.01.015.

RIVALLAIN, Mathieu, 2013. *Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants*. Paris Est. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2013PEST1038>.

ROBINSON, P. D. et G HUTCHINS, M, 1994. Advanced glazing technology for low energy buildings in the UK. In : *Renewable Energy*. août 1994. Vol. 5, n° 1-4, p. 298-309. DOI 10.1016/0960-1481(94)90387-5.

ROBINSON, Timothy J., 2008. Box-Behnken Designs. In : *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN 978-0-470-06157-2. Disponible à l'adresse : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470061572.eqr029/abstract>.

ROSENFELD, Yehiel et SHOHET, Igal M, 1999. Decision support model for semi-automated selection of renovation alternatives. In : *Automation in Construction*. avril 1999. Vol. 8, n° 4, p. 503-510. DOI 10.1016/S0926-5805(98)00097-1.

ROSS, Lioba, BALTUTTIS, Sven, BABRY, Erik, CORREA, Diego et HINZ, Cyril, 2013. *Examination of the simulation project - Cellule d'habitat à Plancher Solaire Direct*. S.l.

ROY, Bernard, 1985. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris : Economica. ISBN 978-2-7178-0901-5.

ROY, Bernard, 1991. The outranking approach and the foundations of electre methods. In : *Theory and Decision*. juillet 1991. Vol. 31, n° 1, p. 49-73. DOI 10.1007/BF00134132.

ROY, Ranjit K., 2001. *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. S.l. : John Wiley & Sons. Disponible à l'adresse : <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=6zq3c3FaCq8C&oi=fnd&pg=PR11&dq=+Design+of+Experiments+Using+The+Taguchi+Approach:+16+Steps+to+Product+and+Process+Improvement&ots=42XOiticGO&sig=pmC87ggXpwnWLBbY0UXj7RYlm8s>.

RUSSELL, Marion, SHERMAN, Max et RUDD, Armin, 2007. Review of Residential Ventilation Technologies. In : *HVAC&R Research*. 1 mars 2007. Vol. 13, n° 2, p. 325-348. DOI 10.1080/10789669.2007.10390957.

RUTMAN, Emmanuel, INARD, Christian, BAILLY, André et ALLARD, Francis, 2005. A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room. In : *Building and Environment*. janvier 2005. Vol. 40, n° 1, p. 29-37. DOI 10.1016/j.buildenv.2004.05.006.

RYAN, Thomas P., 2006. *Modern Experimental Design*. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-07434-3.

SADINENI, Suresh B., MADALA, Srikanth et BOEHM, Robert F., 2011. Passive building energy savings: A review of building envelope components. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. octobre 2011. Vol. 15, n° 8, p. 3617-3631. DOI 10.1016/j.rser.2011.07.014.

S.A KLEIN et AL, 2010. TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program. In : . Madison, USA : Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. 2010.

SANTAMOURIS, Mat et WOUTERS, Peter, 2006. *Building Ventilation: The State of the Art*. London; Sterling, VA : Routledge. ISBN 978-1-84407-130-2.

SICK, Friedrich, SCHADE, Stefan, MOURTADA, Adel, UH, Dieter et GRAUSAM, Michael, 2014. Dynamic building simulations for the establishment of a moroccan thermal regulation for buildings. In : *Journal of Green Building*. 1 avril 2014. Vol. 9, n° 1, p. 145-165. DOI 10.3992/1943-4618-9.1.145.

SOES, 2015. *Chiffres clés du climat - France et Monde*. Disponible à l'adresse : [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits\\_editoriaux/Publications/Reperes/2014/reperes-cc-climat-france-monde-ed-2015.pdf](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2014/reperes-cc-climat-france-monde-ed-2015.pdf).

SPENDLEY, W., HEXT, G. R. et HIMSWORTH, F. R., 1962. Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation. In : *Technometrics*. 1 novembre 1962. Vol. 4, n° 4, p. 441-461. DOI 10.1080/00401706.1962.10490033.

TINSSON, Walter, 2010. *Plans d'expérience constructions et analyses statistiques*. Berlin; Heidelberg; London : Springer. ISBN 978-3-642-11471-7.

TIPEE, 2014. *Rapport d'étude-Audit énergétique du bâtiment PN6*.

TOVE BRUNZELL et SANAA DURIC, 2012. *Moroccan Architecture, traditional and modern – A field study in Casablanca, Morocco*. LTH School of Engineering Lund University, Box 882 SE - 251 08 Helsingborg Sweden.

TSIKALOUDAKI, Katerina, LASKOS, Konstantinos, THEODOSIOU, Theodoros et BIKAS, Dimitrios, 2015. The energy performance of windows in Mediterranean regions. In : *Energy and Buildings*. 1 avril 2015. Vol. 92, p. 180-187. DOI 10.1016/j.enbuild.2015.01.059.

UNFCCC, 2008. *Kyoto protocol-Reference manual*. Disponible à l'adresse : [http://unfccc.int/resource/docs/publications/08\\_unfccc\\_kp\\_ref\\_manual.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf).

UNITED NATIONS, 2013. *World Population Prospects, the 2012 Revision*. Disponible à l'adresse : <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>.

VAN NOSTRAND, Richard Craig, 2002. Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement. In : *Technometrics*. 2002. Vol. 44, n° 3, p. 289–289.

WANG, Weimin, ZMEUREANU, Radu et RIVARD, Hugues, 2005. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. In : *Building and Environment*. novembre 2005. Vol. 40, n° 11, p. 1512-1525. DOI 10.1016/j.buildenv.2004.11.017.

ZOPOUNIDIS, Constantin et PARDALOS, Panos M. (éd.), 2010. *Handbook of Multicriteria Analysis*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. Applied Optimization. ISBN 978-3-540-92827-0. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-92828-7>.



## Liste des figures

Figure 1-1: Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire en Mtep (IEA, 2014)..	17
Figure 1-2 : Evolution du PIB mondial en Milliard de Dollars (BIRD-IDA, 2015).....	17
Figure 1-3 : Consommation d'énergie finale par secteur dans le monde en 2010 (IEA, 2012).....	18
Figure 1-4 : Répartition des émissions mondiales de GES par secteur en 2010 (Edenhofer et al., 2014).....	19
Figure 1-5 : Emissions de CO <sub>2</sub> en MT dans les PNM et PSEM entre 1971 et 2025 (El Andaloussi, 2010).....	20
Figure 1-6 : Consommation d'énergie finale par secteur en France (SOeS, 2015). ....	21
Figure 1-7 : Émissions de CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère, par secteur, en France métropolitaine (CITEPA, 2014). ....	22
Figure 1-8 : Evolution de la population et de PIB au Maroc entre 1960 et 2013. ....	24
Figure 1-9 : Evolution de la consommation énergétique primaire et de la facture énergétique au Maroc entre 2004 et 2012 (11 Dirhams ≈ 1€). ....	25
Figure 1-10 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre entre 1960 et 2010 au Maroc (BIRD-IDA, 2015). ....	26
Figure 1-11: Frise chronologique des réglementations thermiques avec les principaux éléments déclencheurs (Patry, Molle, 2013). ....	30
Figure 1-12 : Zonage climatique en France selon la RT 2012. ....	31
Figure 1-13 : Les conditions d'application de la RT existant. ....	32
Figure 1-14 : Définition des zones climatiques du Maroc dans le cadre de la RTCM. ....	36
Figure 1-15 : La valeur de <i>Mpgeo</i> en fonction de la zone climatique et le type de logement. ....	42
Figure 1-16 : Coefficient de rigueur climatique et d'altitude.....	43
Figure 1-17 : la comparaison entre les différents labels Minergie.....	45
Figure 1-18 : Les exigences minimales du coefficient de transmission des parois.....	48
Figure 1-19 : Caractéristique de certains types de vitrage et limites réglementaires du coefficient de transmission thermique.....	50
Figure 1-20 : Ponts thermiques types a) linéaire b) ponctuel.....	51
Figure 1-21 : Effets combinés du vent et du tirage thermique (Russell et al., 2007).....	53
Figure 1-22 : Les défauts d'étanchéité des bâtiments sources de courants d'air inconfortables (Liébard, Herde, 2006). ....	54
Figure 1-23 : Exemple d'une maison équipée par une ventilation mécanique simple flux (Haut, 2011).....	56
Figure 1-24 : Exemple d'une maison équipée par une ventilation mécanique double flux et le schéma de l'échangeur de chaleur.....	57
Figure 1-25 : Le principe de fonctionnement d'un puits climatique pour la ventilation d'une maison individuelle. ....	58

Figure 1-26 : La variation du chauffage, du free-cooling et de la climatisation lorsque la température flottante est (a) supérieur (b) inférieure à la température extérieure (Ghiaus, Allard, 2006).....	59
Figure 1-27 : Schéma d'une éolienne.....	64
Figure 1-28 : Les différents enjeux dans le secteur du bâtiment.....	65
Figure 2-1. Représentation de l'espace de recherche et l'espace des objectifs correspondant à un problème à trois paramètres et trois fonctions objectifs.....	68
Figure 2-2. Illustration de la relation de dominance dans le cas de deux fonctions objectifs. ....	86
Figure 2-3. Front de Pareto (P) et l'ensemble des solutions dominées (S) sur un problème de minimisation à deux objectifs .....	87
Figure 2-4. Représentation du point idéal et du point "nadir sur une minimisation à deux objectifs .....	88
Figure 2-5 : La distance d entre le point idéal et le Front de Pareto dans le cas de deux critères. .	95
Figure 2-6 : Démarche proposée pour l'aide à la décision multicritère .....	95
Figure 2-7 : Vue 3D de la maison étudiée.....	96
Figure 2-8 : Comparaison entre les résultats du modèle polynômial et les simulations numériques pour le plan D-optimal de 21 simulations. ....	100
Figure 2-9 : Solution dominée et Front de Pareto calculé à partir: a) des simulations à l'aide de TRNSYS b) du modèle polynomial. ....	100
Figure 3-1 : Variation de la température extérieure pendant une année pour les six zones climatiques du Maroc .....	104
Figure 3-2 : Fréquences cumulées annuelles de la température extérieure des climats étudiés...	105
Figure 3-3 : Nombre de degrés heures de chauffage des six zones climatiques du Maroc.....	105
Figure 3-4 : Nombre de degrés heures de rafraîchissement des six zones climatiques du Maroc. ....	106
Figure 3-5 : Plan du Rez-de-chaussée et de l'étage du bâtiment étudié.....	106
Figure 3-6 : Modélisation du bâtiment sous Trnsys 3d.....	107
Figure 3-7 : Besoins de chauffage, de refroidissement et en énergie finale du bâtiment de référence dans les six zones climatiques. ....	108
Figure 3-8 : Degrés heures de rafraîchissement calculés par l'approche adaptative (à gauche) et par l'approche conventionnelle (à droite) pour les six zones climatiques du Maroc (la température de consigne est 26°C).....	111
Figure 3-9 : Effet de l'orientation sur les besoins d'énergie finale pour les six zones climatiques du Maroc. ....	112
Figure 3-10 : Effet du taux de surfaces vitrées sur les besoins énergétiques pour les six zones climatiques du Maroc. ....	113
Figure 3-11 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Agadir .....	116
Figure 3-12 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Tanger.....	117

Figure 3-13 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Fès.....	117
Figure 3-14 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Ifrane.....	118
Figure 3-15 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Marrakech.....	119
Figure 3-16 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage à Errachidia .....	119
Figure 3-17 : Erreur maximale entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de chauffage.....	120
Figure 3-18 : Erreur moyenne entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de chauffage.....	121
Figure 3-19 : Ecart type standard entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de chauffage.....	121
Figure 3-20 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Agadir.....	122
Figure 3-21 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Tanger.....	123
Figure 3-22 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Fès .....	124
Figure 3-23 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Ifrane .....	124
Figure 3-24 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à à Marrakech.....	125
Figure 3-25 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des besoins de refroidissement à Errachidia .....	126
Figure 3-26 : Erreur maximale entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de refroidissement.....	126
Figure 3-27 : Erreur moyenne entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de refroidissement.....	127
Figure 3-28 : Ecart type standard entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins de refroidissement.....	127
Figure 3-29 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Agadir .....	128
Figure 3-30 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Tanger .....	129
Figure 3-31 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Fès .....	129
Figure 3-32 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Ifrane .....	130

Figure 3-33 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins en énergie finale à Marrakech .....	131
Figure 3-34 : Comparaison modèle polynomial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins d'énergie finale à Errachidia .....	131
Figure 3-35 : Erreur maximale entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins d'énergie finale .....	132
Figure 3-36 : Erreur moyenne entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins d'énergie finale .....	132
Figure 3-37 : Ecart type standard entre les modèles polynomiaux et les simulations dans le cas de la prédiction des besoins d'énergie finale .....	133
Figure 3-38 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction des degrés heures d'inconfort d'été aux six zones climatiques au Maroc .....	134
Figure 3-39 : Comparaison entre les modèles polynomiaux et les simulations numériques pour la prédiction du taux d'inconfort d'été dans les six zones climatiques.....	135
Figure 3-40 : Effet des paramètres sur les besoins de chauffage pour les six zones climatiques	137
Figure 3-41 : Effets des paramètres sur les besoins de refroidissement pour les six zones climatiques .....	139
Figure 3-42 : Effets des paramètres sur les besoins d'énergie finale pour les six zones climatiques .....	140
Figure 3-43 : Effets des paramètres sur le taux d'inconfort d'été pour les six zones climatiques .....	142
Figure 3-44 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Agadir.....	146
Figure 3-45 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Tanger .....	147
Figure 3-46 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Fès .....	148
Figure 3-47 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Ifrane .....	149
Figure 3-48 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Marrakech .....	150
Figure 3-49 : Fronts de Pareto entre les besoins d'énergie finale, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Errachidia .....	151
Figure 3-50 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Agadir.....	155
Figure 3-51 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Tanger.....	157

Figure 3-52 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Fès .....	159
Figure 3-53 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Ifrane .....	161
Figure 3-54 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Marrakech.....	163
Figure 3-55 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, le surcoût d'investissement, le coût global sur le cycle de vie et le temps de retour sur investissement pour Errachidia .....	165
Figure 4-1 : Vue aérienne et latérale du bâtiment étudié à La Rochelle. ....	170
Figure 4-2 : La température annuelle extérieure à La Rochelle. ....	171
Figure 4-3 : Irradiation solaire globale annuelle sur un plan horizontal à La Rochelle .....	171
Figure 4-4 : Bilan énergétique par poste consommateur.....	174
Figure 4-5 : Etiquette énergie (à gauche) et climat (à droite) après diagnostic de performance énergétique .....	175
Figure 4-6 : Modélisation du bâtiment sous Trnsys 3d. ....	175
Figure 4-7 : Scénario d'occupation et apport de chaleur.....	176
Figure 4-8 : Comparaison des résultats obtenus par les modèles polynomiaux et ceux des simulations numériques pour la prédiction des besoins de chauffage. ....	179
Figure 4-9 : Comparaison entre les résultats obtenus par les modèles polynomiaux et ceux des simulations numériques pour la prédiction du taux d'inconfort d'été pour le bâtiment étudié. ..	180
Figure 4-10 : Effet des paramètres sur les besoins de chauffage à La Rochelle. ....	181
Figure 4-11 : Effet des paramètres sur le taux d'inconfort d'été à La Rochelle. ....	182
Figure 4-12 : Fronts de Pareto entre les besoins de chauffage, le taux d'inconfort d'été, les impacts économiques et environnementaux pour La Rochelle. ....	188



## Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Les valeurs du coefficient maximal de la <i>Cepmax</i> en kWh/m <sup>2</sup> .an.....	32
Tableau 1-2 : Résistance thermique des parois opaques en fonction de la zone climatique. ....	33
Tableau 1-3 : Caractéristique des fenêtres et du vitrage. ....	33
Tableau 1-4 : le coefficient EER minimal en fonction de type de climatiseur. ....	35
Tableau 1-5 : Besoins thermiques maximaux des bâtiments au Maroc en kWh/m <sup>2</sup> .an. ....	37
Tableau 1-6 : Exigences limites pour le coefficient de performance des pompes à chaleur au Maroc. ....	37
Tableau 1-7 : Les caractéristiques des parois opaques des bâtiments au Maroc utilisées pour l'élaboration de la RTCM. ....	38
Tableau 1-8 : Les caractéristiques des parois opaques des bâtiments au Maroc.....	38
Tableau 1-9 : Données utilisées pour l'élaboration de la RTCM (Sick et al., 2014). ....	39
Tableau 1-10 : Coefficients conventionnels de passage en énergie primaire non renouvelable. ....	40
Tableau 1-11 : La consommation d'énergie de référence <i>Aueref</i> . ....	41
Tableau 1-12 : Les exigences minimales du label Minergie pour le coefficient U (W/m <sup>2</sup> .K) des parois. ....	44
Tableau 1-13 : Solutions techniques préconisées pour un bâtiment PASSIVHAUS (Chlela, 2008). ....	46
Tableau 1-14 : Les exigences sur le taux d'infiltration d'air dans l'Union européenne, les États-Unis et les programmes de logement avancés. ....	54
Tableau 1-15 : Les caractéristiques des différentes lampes (ADEREE, 2015a). ....	59
Tableau 1-16 : L'intervalle de variation du coefficient de performance du PAC. ....	61
Tableau 2-1 : Les paramètres d'études sélectionnées pour l'optimisation énergétique du bâtiment. ....	69
Tableau 2-2 : Indicateurs environnementaux utilisés dans la base de données INIES (issus de la norme NF P01-010). ....	74
Tableau 2-3 : les paramètres d'étude choisis et leurs intervalles de variation. ....	96
Tableau 2-4 : Les différentes solutions techniques et leurs prix associés en Dirhams (1€ ≈ 11 Dhs). ....	98
Tableau 2-5 : Le plan D-optimal dans le cas de 5 paramètres et 2 niveaux. ....	99
Tableau 2-6 : Comparaison entre la solution 'compromis' déterminée par l'étude paramétrique à l'aide de TRNSYS et celle obtenue par le modèle développé. ....	101
Tableau 3-1 : Charges internes des appareils .....	108
Tableau 3-2 : Pourcentage de réduction des besoins d'énergie finale du bâtiment de référence par rapport aux limites réglementaires. ....	109
Tableau 3-3 : Les valeurs minimales et maximales retenues pour chaque paramètre d'étude. ....	114
Tableau 3-4. Nombre de simulations réduit par les plans D-optimaux pour chaque modèle polynomial. ....	115

Tableau 3-5. Erreur maximale, erreur moyenne et écart type des modèles de prédiction du taux d'inconfort d'été. ....	136
Tableau 3-6 : Surcoûts d'investissement et d'entretien en fonction de l'épaisseur d'isolation des murs extérieurs et de la toiture. ....	143
Tableau 3-7 : Surcoûts d'investissement et d'entretien pour les différents vitrages. ....	144
Tableau 3-8 : Les surcoûts d'investissement et d'entretien des cadres de fenêtre. ....	144
Tableau 3-9 : Surcoûts d'investissement et d'entretien dans le cas de traitement des ponts thermiques. ....	144
Tableau 3-10 : Surcoûts d'investissement et d'entretien des systèmes de ventilation. ....	144
Tableau 3-11 : Surcoûts d'investissement et d'entretien des peintures. ....	145
Tableau 3-12 : Les solutions optimales retenues dans le cas de quatre critères. ....	153
Tableau 3-13 : Les solutions optimales retenues dans le cas de cinq critères. ....	153
Tableau 4-1 : Description des éléments existants de l'enveloppe. ....	173
Tableau 4-2 : Charges internes des appareils. ....	176
Tableau 4-3 : Les valeurs minimales et maximales retenues pour chaque paramètre d'étude. ...	177
Tableau 4-4 : Les impacts environnementaux, les surcoûts d'investissement et d'entretien en fonction de l'épaisseur d'isolation des murs extérieurs par la laine de roche. ....	184
Tableau 4-5 : Les impacts environnementaux, les surcoûts d'investissement et d'entretien des différentes fenêtres. ....	185
Tableau 4-6 : Les impacts environnementaux, les surcoûts d'investissement et d'entretien des systèmes de ventilation. ....	185