

## Résumé

Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie dans le monde. De ce fait, il est le premier producteur de gaz à effet de serre. Afin de réussir la transition énergétique du secteur, l'efficacité énergétique et le déploiement des énergies renouvelables sont les principaux piliers pour contrer le réchauffement climatique qui menace de plus en plus notre planète. Le sujet de ce travail de thèse s'inscrit dans le processus de résolution de ces problématiques. En effet, l'outil « Sensitivity Analysis and Multiobjective Optimization Tool » (*SAMOT*) a été développé dans le cadre de travail dans le but de faciliter l'aide à la décision dès les phases amont des projets de construction des bâtiments à haute efficacité énergétique. L'outil est basé sur l'utilisation de l'analyse de sensibilité, pour comprendre et analyser le comportement du bâtiment en hiérarchisant l'impact de ses *inputs*, l'optimisation multicritère avec ou sans contraintes ainsi que la modélisation polynomiale des fonctions étudiées sur *TRNSYS* à travers l'utilisation des plans d'expériences et des techniques de la régression polynomiale par Réseau de Neurones Artificiels (*ANN*). Nous avons analysé l'impact du réchauffement climatique sur la conception de notre bâtiment modèle dans la région de Settat, et il s'avère que selon les scénarios du GIEC, la conception basée aujourd'hui sur les besoins de chauffage sera compromise à partir de 2050 à cause de la prépondérance future des besoins de climatisation. Deux méthodologies ont été utilisées pour optimiser la performance de notre bâtiment modèle : l'optimisation directe sur *TRNSYS* ainsi que l'utilisation des plans d'expérience et de la métamodélisation. Les deux méthodes présentent des à la fois des avantages (précision de la première, et temps de calcul réduit de la seconde) et des inconvénients (temps de calcul important pour la première, incertitude sur la précision pour la deuxième). Nous avons ainsi proposé, dans le dernier cas d'étude, une nouvelle méthodologie innovante qui conjugue l'utilisation des algorithmes génétiques à la métamodélisation par les Réseaux de Neurones Artificiels. Cette méthode nous a permis de proposer des solutions performantes à un problème d'optimisation à huit critères avec contraintes.

**Mots clefs :** *Efficacité énergétique, Bâtiment, TRNSYS, Analyse de sensibilité, Optimisation, Aide à la décision, Réchauffement climatique, Métamodélisation, Algorithmes génétiques, Réseau de neurones artificiels*

## Abstract

The construction sector is the world's largest energy consumer. As a result, it is the leading producer of greenhouse gases. To allow the sector's energy transition, Energy Efficiency and Renewable Energies are the main pillars to counter successfully the global warming that threatens our planet. The current work takes part in the process of solving these problematics. In fact, we developed the SAMOT Tool (Sensitivity Analysis and Multiobjective Optimization Tool) in order to facilitate the decision-making from the early phases of buildings construction. It is mainly based on sensitivity analysis, multiobjective optimization and polynomial metamodeling. Firstly, sensitivity analysis allows understanding the building behavior by ranking the impact of its inputs. Secondly, the multiobjective optimization, with or without constraints, makes it possible to obtain the best solutions to a multi-criteria problem. Finally, the polynomial metamodeling of the "black-box" functions studied on *TRNSYS* (by using experimental designs and polynomial regression techniques by artificial neural network *ANN*) allows having polynomial models of these functions, and therefore studying them without launching any additional simulations on *TRNSYS*. We analyzed the impact of global warming on the design of our model building in Settat, and it appears that according to *IPCC* scenarios, the design based today on heating needs may be compromised from 2050 onwards because of the future preponderance of cooling needs. We used two methods to optimize the overall performance of our model building: optimization directly on *TRNSYS* or through experimental designs and metamodeling. Both methods have advantages (precision of the first, and reduced calculation time of the second) and drawbacks (long calculation time for the first, uncertainty on the precision for the second). We have thus proposed a new methodology that combines the use of genetic algorithms with metamodeling via Artificial Neural Networks. This method allowed us to propose efficient results for an eight-objective optimization problem with constraints, with only a few runs on *TRNSYS*.

**Keywords:** *Energy efficiency, Building, TRNSYS, Sensitivity analysis, Optimization, Global warming, Metamodeling, Genetic algorithms, Artificial neural network*



Université Hassan 1<sup>er</sup>  
Centre d'Études Doctorales



Faculté des Sciences et Techniques de  
Settat

## THÈSE DE DOCTORAT

Pour l'obtention de grade de Docteur en Sciences et Techniques  
de l'Université Hassan 1<sup>er</sup>

Formation Doctorale : Physique et Sciences de l'Ingénieur

Spécialité : Modélisation et Efficacité Énergétique

Sous le thème

## Optimisation des ressources énergétiques pour la conception des bâtiments à haute efficacité énergétique

Présentée par :

**Abdelhadi SERBOUTI**

Soutenue le 03/03/2021

A la Faculté des Sciences et Techniques de Settat devant le jury composé de :

Pr. El Mostafa OUALIM	Université Hassan 1 <sup>er</sup> , ENSA Berrechid	Président
Pr. Khadija CHOUKAIRY	Université Sultan My. Slimane, ENSA Khouribga	Rapporteuse
Pr. Ahmed BAHLAOUI	Université Sultan My. Slimane, FP Béni Mellal	Rapporteur
Pr. Taoufiq MOUHIB	Université Hassan 1 <sup>er</sup> , ENSA Berrechid	Rapporteur
Pr. Mohamed HARMOUCHI	Université Hassan 1 <sup>er</sup> , FST Settat	Examineur
Pr. Abdellah BOULAL	Université Hassan 1 <sup>er</sup> , FST Settat	Examineur
Pr. Mourad RATTAL	Université Hassan 1 <sup>er</sup> , ISSS Settat	Co-Directeur de thèse
Pr. Azeddine MOUHSEN	Université Hassan 1 <sup>er</sup> , FST Settat	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2020/2021

Abdelhadi SERBOUTI

Optimisation des ressources énergétiques pour la conception des bâtiments à  
haute efficacité énergétique

Année, 2021  
Initiale Formation doctorale PSI

## ***Remerciements***

Ce travail de recherche a été mené au sein du laboratoire Rayonnement-Matière et Instrumentation (RMI) de la faculté des Sciences et Techniques de Settat.

Je le dédie à mon père. Ce travail est le fruit de son amour et de ses encouragements.

Je tiens à remercier du fond du cœur et à exprimer ma gratitude à mon directeur de thèse Monsieur Azeddine Mouhsen, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, pour toute la confiance qu'il m'a accordée depuis le démarrage de la thèse, ainsi que pour son soutien, sa disponibilité et son précieux encadrement tout au long de ces années de thèse.

Un grand merci au Professeur Mourad Rattal, co-directeur de ma thèse, Professeur à l'Institut Supérieur des Sciences de la Santé de Settat, pour ses conseils très pertinents et constructifs, qui m'ont permis de mener à bien l'élaboration de mes travaux de thèse.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Abdellah Boulal, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, pour ses idées et son expertise dans l'énergétique du Bâtiment, ainsi que pour sa disponibilité pour analyser et corriger mon travail.

Je remercie chaleureusement les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce manuscrit.

Merci à l'ensemble du corps professoral de la Faculté des Sciences et Techniques de Settat.

Et enfin pensée à ma chère famille et à mes amis pour leur amour inconditionnel, leur soutien et leurs encouragements.

## *Principales abréviations*

<i>ADEME</i>	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
<i>ADEREE</i>	L'Agence de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique
<i>AMEE</i>	Agence Marocaine de l'Efficacité Energétique
<i>ANN ou RNA</i>	Artificial Neural Network / Réseau de Neurones Artificiels
<i>ASHRAE</i>	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
<i>BEPOS</i>	Bâtiment à énergie positive
<i>BP</i>	Compagnie britannique de raffinage et de vente du pétrole
<i>BTP</i>	Bâtiment Travaux Publics
<i>C</i>	La capacité thermique
<i>COP</i>	Conférence internationale sur le climat
<i>CSTB</i>	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
<i>D</i>	La diffusivité thermique
<i>ECS</i>	Eau chaude sanitaire
<i>GA</i>	Algorithme génétique
<i>GES</i>	Gaz à effet de serre
<i>GPEI</i>	Garantie de performance énergétique intrinsèque
<i>GUI</i>	Graphical User Interface
<i>IPCC</i>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<i>GIEC</i>	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
<i>IRA / IRB</i>	Spectres Infrarouges
<i>LHS</i>	Latin Hypercube Sample
<i>NZEB</i>	Nearly Zero Energy Building
<i>ONDH</i>	Observatoire National du Développement Humain
<i>ONU</i>	Organisation des Nations unies
<i>PIB</i>	Produit Intérieur Brut
<i>PSEM</i>	Pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée
<i>R</i>	La résistance thermique
<i>RGPH</i>	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
<i>RT</i>	Réglementation thermique
<i>RTCM</i>	Règlement thermique de construction marocain
<i>SAMOT</i>	Sensitivity Analysis & Multi-objective Optimization Tool
<i>STD</i>	Simulation Thermique Dynamique
<i>TGBV</i>	Taux global des baies vitrées
<i>TRNSYS</i>	Transient System Simulation Tool
<i>U</i>	Coefficient de transmission thermique
<i>UVA / UVB</i>	Spectres Ultraviolets
<i>VMC</i>	Ventilation mécanique contrôlée

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre 1 - Problématiques énergétiques et réglementations</b>	<b>11</b>
<b>Introduction</b>	<b>11</b>
<b>1. Situation énergétique mondiale</b>	<b>11</b>
Mix énergétique mondial	11
Mix électrique par grande région	12
Emissions de gaz à effet de serre	12
Situation du Bâtiment au niveau mondial	12
1.4.1. Généralités	12
1.4.2. Emissions du secteur du Bâtiment	14
<b>2. Situation énergétique marocaine</b>	<b>14</b>
2.1. Généralités	14
2.2. Mix énergétique national	16
2.3. Emissions de gaz à effet de serre	17
2.4. Secteur du Bâtiment au Maroc	18
2.4.1. Généralités	18
2.4.2. Répartition des consommations	18
2.4.3. Typologie des constructions marocaines	19
<b>3. Etat de l'art des réglementations</b>	<b>21</b>
3.1. Réglementations et Normes	21
3.1.1. Réglementation américaine	21
3.1.2. Réglementation française	22
3.1.2.1. Les bâtiments neufs (RT 2012)	22
3.1.2.2. Les bâtiments existants (RT 2007/2008)	23
3.1.2.3. Projet de la RT2020	23
3.1.3. Directive Européenne EPBD	24
3.1.4. La réglementation thermique en Espagne	24
3.1.5. Pays du MAGHREB	24
3.1.5.1. Algérie	25
3.1.5.2. Tunisie	25
3.1.6. Etat des réglementations dans quelques pays méditerranéens	26
3.1.7. Règlement thermique de construction marocain	27
<b>Conclusion</b>	<b>28</b>

## **Chapitre 2 - Présentation des logiciels, des données météo & de construction \_\_\_\_ 29**

<b>1. Introduction</b>	<b>29</b>
<b>2. Les outils de simulation des bâtiments à faible consommation énergétique</b>	<b>29</b>
2.1. Etat de l'art des outils	29
2.2. Présentation de l'outil TRNSYS	29
2.3. Meteonorm	30
<b>3. Analyse des données météorologiques marocaines</b>	<b>30</b>
3.1. Présentation	30
3.1.1. Zone 1 : Agadir	31
3.1.2. Zone 2 : Tanger	33
3.1.3. Zone 3 : Fès	34
3.1.4. Zone 4 : Ifrane	35
3.1.5. Zone 5 : Marrakech	35
3.1.6. Zone 6 : Er-Rachidia	35
3.2. Irradiations solaires globales	36
3.2.1. Le rayonnement solaire	36
3.2.2. Les irradiations solaires des différentes villes	37
3.3. Méthode des Degrés jours	38
<b>4. Eléments de l'enveloppe du bâtiment</b>	<b>40</b>
4.1. Enveloppe du bâtiment	40
4.1.1. Parois opaques	40
4.1.1.1. Un coefficient de transmission thermique U	40
4.1.1.2. Un coefficient d'absorption solaire	41
4.1.2. Fenêtres	41
4.2. Ventilation et protections solaires	42
4.2.1. Ventilation :	42
4.2.1.1. Ventilation naturelle	43
4.2.1.2. Ventilation mécanique	43
4.2.1.2.1. La ventilation simple flux	43
4.2.1.2.2. Ventilation double flux	44
4.2.2. Protection solaire	44
<b>5. Matériaux de construction</b>	<b>44</b>
5.1. Caractéristiques thermiques des matériaux	44
5.1.1. Conductivité thermique	44
5.1.2. Capacité thermique	45
5.1.3. Diffusivité thermique	46
5.2. Matériaux de construction au Maroc	46

5.3.	Isolants thermiques	47
5.4.	Modèles de construction efficace au Maroc	47
5.5.	Modes de construction au Maroc	49
<b>Conclusion</b>		<b>51</b>
<b>Chapitre 3 - Développement de l'outil SAMOT (Sensitivity Analysis And Multiobjective Optimization Tool)</b>		<b>52</b>
<b>1. Etat de l'art des méthodologies d'analyse de sensibilité, d'optimisation multicritère et de régression polynomiale</b>		
1.1.	Analyse de sensibilité	52
1.1.1.	Description des méthodes d'analyses de sensibilité	52
1.1.2.	Méthodes d'analyse de sensibilité	54
1.1.2.1.	Méthode de Screening	54
1.1.2.2.	Analyses de sensibilité locale	54
1.1.2.3.	Analyses de sensibilité globale	55
1.2.	Optimisation multicritère	56
1.2.1.	Généralités	56
1.2.2.	Optimisation multicritère dans l'énergétique du bâtiment	57
1.2.3.	Méthodologies d'optimisation	57
1.2.3.1.	Méthodologies d'optimisation	57
1.2.3.1.1.	Algorithmes génétiques	58
1.2.4.	Front de Pareto	64
1.3.	Plans d'expérience et métamodélisation	64
1.3.1.	Introduction	64
1.3.2.	Etat de l'art et définitions	65
1.3.2.1.	Plans factoriels complets	65
1.3.2.2.	Plans factoriels fractionnaires	66
1.3.2.3.	Plans D-optimaux	66
1.3.2.4.	Plans composites	66
1.3.2.5.	Plans de Box-Behnken	66
1.3.2.6.	Autres plans	66
1.3.2.7.	Latin Hypercube Sampling	67
1.3.3.	Métamodélisation	67
1.3.3.1.	Modèle linéaire	68
1.3.3.2.	Modèle linéaire avec interactions	68
1.3.3.3.	Modèle quadratique avec interactions	69
1.3.4.	Réseau de Neurones Artificiels ANN	69
1.3.5.	Outils de comparaison des modèles	70

<b>2. Développement de l'outil SAMOT</b>	<b>70</b>
2.1. Etat de l'art des outils d'optimisation couplables à TRNSYS	70
2.1.1. GENOPT	71
2.1.2. MOBO	72
2.2. Genèse de l'outil SAMOT	72
2.3. Etape de conception du logiciel	72
2.3.1. La définition globale du problème, du besoin et du cahier des charges	72
2.3.2. Utilisateurs ciblés	73
2.3.3. Environnement de travail	73
2.3.3.1. SALib (Sensitivity Analysis Library)	74
2.3.3.2. Platypus	74
2.3.3.3. PyDOE	74
2.3.3.4. Matplotlib	75
2.3.3.5. Scikit-learn	75
2.3.3.6. Tkinter & Pyinstaller	75
2.3.4. Etapes de création de SAMOT	75
2.4. Architecture globale du système	75
2.4.1. Comment interagir avec TRNSYS ?	75
2.4.2. Comment spécifier les paramètres à étudier ?	77
2.4.3. Interface	77
2.4.3.1. Onglet Analyse de sensibilité	77
2.4.3.2. Onglet Optimisation Multicritère	78
2.4.3.3. Nouvelle méthodologie d'optimisation développée dans le cadre de la thèse	78
<b>3. Première application de SAMOT : optimisation multicritère pour choisir les types des isolants</b>	<b>79</b>
3.1. Paramètres d'entrée	79
3.2. Résultats	81
<b>Conclusion</b>	<b>83</b>

***Chapitre 4 - Optimisation des performances énergétiques, économiques et environnementales d'un bâtiment avec SAMOT, avec prise en compte des effets du réchauffement climatique*** **84**

<b>1. Introduction</b>	<b>84</b>
<b>2. Etude du réchauffement climatique sur Meteonorm</b>	<b>85</b>
2.1. Présentation des scénarios	86
2.1.1. B1 (scenario optimiste, 2°C de réchauffement en 2100)	86
2.1.2. A1B (scénario moyen, 3°C)	86

2.1.3.	A2 (scénario pessimiste, 3.5°C)	86
2.2.	Evolution des températures selon les différents scénarios	87
2.1.	Evolution des degrés-jours selon les différents scénarios	88
2.1.1.	Evolution des degrés-jours à Settat selon le scénario B1	88
2.1.2.	Evolution des degrés-jours à Settat selon le scénario A2	88
<b>3.</b>	<b>Bâtiment modèle</b>	<b>88</b>
3.1.	Plancher bas en contact avec le sol	89
3.2.	Modélisation sur TRNSYS	91
3.3.	Résultats initiaux	92
3.3.1.	Résultats sans chauffage ni climatisation	92
3.3.2.	Résultats avec chauffage et climatisation	92
<b>4.</b>	<b>Choix des paramètres d'entrée et des fonctions à étudier</b>	<b>93</b>
4.1.	Paramètres d'entrée ( <i>inputs</i> )	93
4.2.	Fonctions à étudier ( <i>outputs</i> )	96
4.2.1.	Energie totale	96
4.2.2.	Surcoûts d'investissement	97
4.2.3.	Energie grise	97
<b>5.</b>	<b>Analyse de sensibilité</b>	<b>98</b>
5.1.	Nombre de combinaison à choisir	98
5.1.1.	Méthode de Sobol	99
5.1.2.	Méthode de Morris	101
5.1.3.	Méthode Delta Moment-Independent Measure	103
5.2.	Analyse de sensibilité des besoins de chauffage et de climatisation	104
5.3.	Analyse de sensibilité pour les scénarios B1 et A2	107
5.3.1.	Scénario B1 :	108
5.3.2.	Scénario A2 :	111
<b>6.</b>	<b>Optimisation multicritère</b>	<b>112</b>
6.1.	Problème d'optimisation	112
6.2.	Optimisation directe : Scénario pessimiste A2	113
6.3.	Optimisation par utilisation des plans d'expérience : Scénario B1	117
6.3.1.	Précision du modèle	117
6.3.2.	Résultats de l'optimisation	120
6.3.3.	Comparaison des algorithmes	121
6.4.	Analyse des deux méthodes d'optimisation	123
<b>7.</b>	<b>Nouvelle Méthodologie d'optimisation et application : Optimisation multicritère du bâtiment dans les six zones climatiques du Maroc</b>	<b>123</b>



7.1.	Analyse de sensibilité du modèle	124
7.2.	Nouvelle méthodologie d'optimisation proposée dans le cadre de la thèse	125
7.3.	Résultats	126
7.3.1.	Plan LHS à 1000 échantillon	126
7.3.2.	Plan LHS à 300 échantillons	133
	<b>Conclusion</b>	<b>134</b>
	<b>Conclusion générale</b>	<b>136</b>
	<b>Travaux de recherche</b>	<b>139</b>
	<i>Bibliographie</i>	<i>140</i>
	<i>Liste des tableaux</i>	<i>145</i>
	<i>Table des illustrations</i>	<i>146</i>

# **INTRODUCTION GENERALE**

Aujourd'hui, le changement climatique induit par les émissions mondiales des gaz à effet de serre continue à causer des dégâts majeurs sur la planète terre et nécessite par conséquent la mobilisation et l'engagement de tous les pays, afin de trouver des solutions durables permettant de réduire sa criticité pour les générations à venir.

En outre, la production énergétique, sans cesse en croissance sur la base de ressources minérales issues de l'écorce terrestre, accélère le processus de l'épuisement des ressources et favorise les tensions économiques, sociales et géopolitiques. Il est ainsi plus que jamais primordial de résoudre la problématique énergétique mondiale en apportant des réponses durables à la fois sur les plans de l'énergie et de l'environnement.

Tous les secteurs sont concernés par cette réflexion ; Le Bâtiment est, en l'occurrence, l'un des piliers de la démarche mondiale de la sauvegarde de la planète. En effet, la construction et l'exploitation de bâtiments représentaient 36% de la consommation d'énergie finale mondiale et près de 40% des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en 2017.

Différents pays ont adopté des réglementations thermiques afin de réduire les consommations énergétiques des bâtiments. Le Maroc a rattrapé son retard dans la matière en adoptant dès l'année 2014 sa première réglementation thermique de construction. Cette réglementation, obligatoire pour les nouvelles constructions, vient encadrer le domaine au pays.

La sobriété énergétique et la rationalisation de l'utilisation des ressources sont ainsi incontournables dans toutes les étapes du cycle de vie des bâtiments ; Le choix des solutions performantes démarre dès la phase conception. Cette étape décisive requiert la maîtrise du comportement du bâtiment ainsi que de ses composants.

Le choix d'une solution dépend de plusieurs facteurs, dont les performances énergétiques, le niveau recherché de confort des occupants, les contraintes économiques ou environnementales etc. Le processus de conception des bâtiments performants passe par l'identification des solutions qui permettent de répondre à ces différents critères, et ainsi par faire un arbitrage entre ces derniers via les outils de l'aide à la décision. La détermination de ces solutions s'avère souvent difficile dès lors que le nombre de paramètres et des objectifs à étudier est important.

Cette complexité du « bâtiment », due à la fois à la multiplicité de ses données d'entrée et des différentes fonctions à étudier, ralentit voire freine le déploiement de l'efficacité énergétique dans le domaine. L'état de l'art de ce dernier manque de méthodologies innovantes, permettant de mieux appréhender les modèles de bâtiments étudiés et d'optimiser leurs performances globales.

Le présent travail de thèse s'inscrit dans cette optique. En effet, il vise à présenter et à développer différentes méthodologies d'étude et d'optimisation du comportement des bâtiments, afin d'apporter des solutions d'aide à la décision aux concepteurs des bâtiments à haute performance énergétique.

Le manuscrit est organisé en quatre chapitres ; Dans le premier chapitre, nous présentons les problématiques énergétiques mondiales, avec un focus sur le cas du Maroc. Les réglementations thermiques dans les pays voisins y sont également détaillées.

Le deuxième chapitre traite des outils utilisés dans le cadre de la thèse. Nous présentons les logiciels de simulation des bâtiments à faible consommation énergétique, analysons les données

météorologiques marocaines qui servent de pilier dans la modélisation et décrivons les éléments de l'enveloppe du bâtiment et les modes de construction marocains qui permettront de choisir notre bâtiment modèle.

Dans le troisième chapitre, nous mettons en exergue l'ensemble des outils nécessaires pour bâtir l'outil *SAMOT* (*Sensitivity Analysis and Multiobjective Optimization Tool*), développé dans le cadre de cette thèse afin d'accompagner les concepteurs des bâtiments à haute efficacité énergétique. Les outils d'analyse de sensibilité, de l'optimisation multicritère, des plans d'expériences et des régressions polynomiales par réseaux de neurones artificiels y sont décrits. Un comparatif des outils disponibles dans l'état de l'art ainsi que le réel intérêt de notre outil est dressé. Enfin, le cahier des charges, l'ergonomie et les fonctionnalités de l'outil *SAMOT* sont présentés. Un premier cas simple d'optimisation multicritère, pour choisir les matériaux de construction de notre bâtiment modèle, démontre de l'intérêt et de l'efficacité de l'outil. Ce dernier est exploité dans des cas plus complexes dans le chapitre 4 de ce mémoire.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons le bâtiment modèle, les paramètres du bâtiment à étudier, ainsi que les différentes fonctions à prendre en compte. Un cas d'étude complexe, avec 13 paramètres d'entrée, discrets et continus, générant une infinité de combinaisons possibles est étudié en prenant en compte l'impact du réchauffement climatique sur la conception du bâtiment. Nous étudions dans cette optique l'évolution des degrés-jours d'été et d'hiver dans l'environnement de la ville de Settat, entre aujourd'hui et 2100. En outre, nous réalisons une optimisation multicritère des performances du bâtiment dans le contexte actuel, celui de l'année 2050 et de l'année 2100 selon deux scénarios de réchauffement climatique proposés par le GIEC. Nous étudions également plusieurs méthodologies d'analyse de sensibilité, et donnons des préconisations quant au choix du nombre de simulation à privilégier pour les réaliser.

L'exercice d'optimisation multicritère (énergétique, économique et environnementale) est réalisé selon deux méthodes (directe ou via la métamodélisation). Finalement, une nouvelle méthodologie d'optimisation, développée dans le cadre de cette thèse et intégrée à l'outil *SAMOT* est décrite dans le chapitre 4. Elle nous permettra de résoudre un problème d'optimisation à 8 critères avec un temps de calcul très réduit, pour optimiser les performances du bâtiment modèle dans les six zones climatiques du Royaume.

Le manuscrit sera finalement clos par une conclusion générale ainsi que par des perspectives de ce travail.

# Chapitre 1 - Problématiques énergétiques et réglementations

## INTRODUCTION

L'efficacité énergétique et les énergies renouvelables sont les principaux piliers de la transition énergétique. Bien qu'il existe différentes possibilités pour limiter le changement climatique, ces deux moyens constituent les meilleures voies pour réussir à réduire une partie significative des émissions, à la vitesse requise. L'association de ces deux éléments peut assurer plus de 90 % des réductions nécessaires d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie, à l'aide de technologies sûres, fiables, économiques et largement disponibles (1).

Dans ce chapitre, nous présentons la situation énergétique mondiale dans son ensemble ainsi que l'état global du secteur du bâtiment dans le monde. Nous nous focalisons ensuite sur le cas du Royaume marocain. Un état de l'art des réglementations mondiales est également dressé pour évaluer les efforts de différents pays voisins dans le chemin de l'efficacité énergétique.

## 1. SITUATION ENERGETIQUE MONDIALE

### 1.1. Mix énergétique mondial

En mars 2018, l'Agence Internationale de l'Energie avait déjà fait état d'une hausse de la consommation mondiale d'énergie de 2,1% en 2017. Le groupe BP a ensuite publié, le 13 juin 2018, son nouveau « *BP Statistical Review of World Energy* » (2) qui présente ses dernières données actualisées sur l'énergie dans le monde, en partageant le constat de l'agence internationale de l'énergie (2,2% dans son rapport) et en confirmant que toutes les sources d'énergie ont été davantage consommées en 2017 dans le monde. Au total, les énergies fossiles auraient encore compté pour 85,2% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2017 (85,5% en 2016) (2). Le pétrole reste de loin la principale source d'énergie du mix énergétique mondial (34,2%), avec une hausse de la consommation de 1,7 million de barils par jour (Mb/j) en 2017.

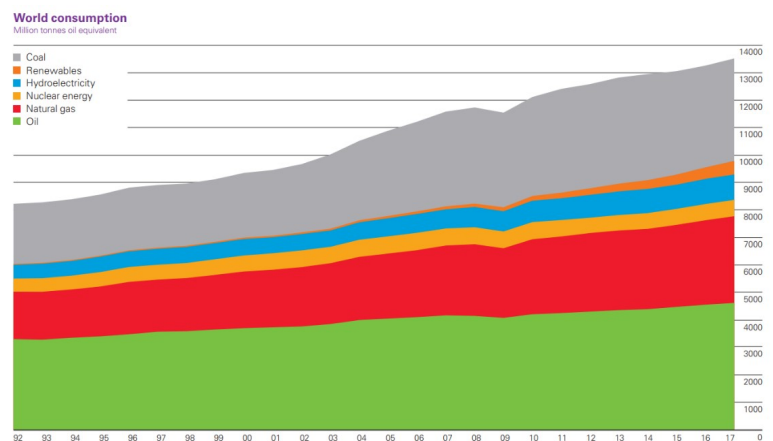


Figure 1-1- Evolution du mix énergétique mondial de 1992 à 2017 (2)

Le développement des énergies renouvelables hors hydroélectricité a été particulièrement important (+ 16,6%) mais celles-ci ne comptaient encore que pour 3,5% de la consommation d'énergie primaire dans le monde en 2017. La part de l'énergie nucléaire reste pour sa part

relativement stable (4,4% en 2017). Nous notons également le constat alarmant que la consommation mondiale d'énergie primaire a doublé au cours des 35 dernières années.

## 1.2. Mix électrique par grande région

Première source d'électricité dans le monde, le charbon fournit la majorité de l'électricité dans la zone Asie-Pacifique. En Afrique, il constitue la deuxième source d'électricité derrière le gaz naturel.

Nous notons le retard du développement des énergies renouvelables dans le continent africain en comparaison avec les Amériques du sud et centrale et l'Asie-Pacifique.

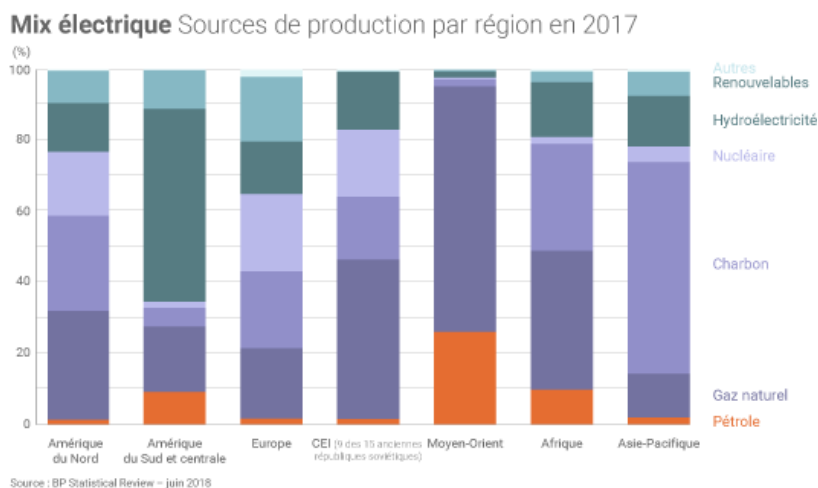


Figure 1-2- Mix énergétique par région en 2017 (2)

## 1.3. Emissions de gaz à effet de serre

Les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> liées à la consommation d'énergie ont augmenté de 1,6% en 2017, après trois années consécutives de quasi-stabilité. Cette évolution, qualifiée de « gros pas en arrière » par BP (2), confirme l'écart très important entre les ambitions exprimées à la conférence internationale sur le climat COP 21 et les tendances actuelles. En guise de détail, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) estime qu'il serait nécessaire, pour atteindre la cible de l'accord de Paris, de faire baisser de 40% à 70% l'ensemble des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050 en comparaison au niveau de 2010, avec une économie quasiment neutre en carbone durant la deuxième partie du 21<sup>ème</sup> siècle.

## 1.4. Situation du Bâtiment au niveau mondial

### 1.4.1. Généralités

Les bâtiments jouent un rôle dominant dans la transition vers les énergies propres. La construction et l'exploitation de bâtiments représentaient 36% de la consommation d'énergie finale mondiale et près de 40% des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en 2017. Ces données couvrent les bâtiments et la construction, y compris la construction de matériaux et de produits pour la construction de bâtiments (3).

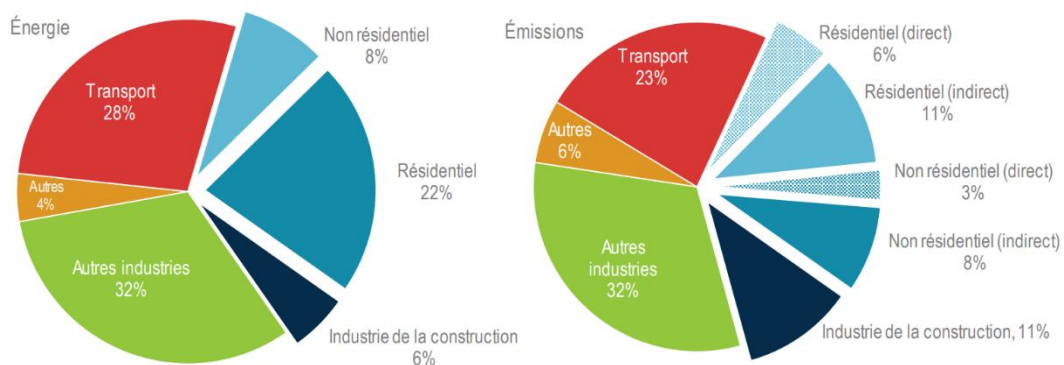


Figure 1-3- Répartition des consommations mondiale et des émissions des gaz à effet de serre par domaine (4)

La part « industrie de la construction » fait référence à la production des matériaux de construction, tels que l'acier, le ciment et le verre (4).

La croissance continue de la population mondiale et de la surface de plancher fait que cette consommation ne cesse de croître. La consommation d'énergie finale mondiale des bâtiments a en effet augmenté d'environ 5% entre 2010 et 2017. Le secteur du bâtiment et de la construction est ainsi un acteur clé dans la lutte contre le dérèglement climatique. L'évolution de la consommation mondiale de combustibles dans les bâtiments est en partie due à l'évolution de la consommation finale, la croissance de la climatisation des locaux et des appareils électroménagers entraînant la croissance de la demande d'électricité dans les bâtiments. La consommation d'énergie pour le refroidissement des locaux a augmenté de plus de 20% dans le monde entier entre 2010 et 2017, tandis que la demande d'électricité des appareils ménagers a augmenté de 18% et que le chauffage des locaux a diminué d'environ 4%. La réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage des locaux, compte tenu de la forte utilisation de combustibles fossiles pour la production de chaleur par rapport à d'autres utilisations finales, contribue également à la part la plus importante de la consommation d'électricité dans les bâtiments (4).

À l'échelle mondiale, les mesures de l'enveloppe du bâtiment (à titre d'exemple, l'amélioration des fenêtres et de l'isolation) et l'amélioration des performances des systèmes énergétiques (par exemple, le chauffage, le refroidissement et la ventilation) et des composants (par exemple, les équipements de cuisine) ont tous permis de compenser les effets de la population et de la surface de plancher. Les effets climatiques des hivers plus chauds ont également limité la croissance énergétique mondiale. Cependant, la consommation d'énergie dans le secteur des bâtiments continue de croître, malgré l'amélioration des enveloppes et des systèmes des bâtiments, qui n'est pas assez rapide afin de compenser la forte croissance de la population et de la surface utile.

Le rapport 2014 de l'ADEME (5) montre que par exemple en France, le chauffage représente le premier poste avec 67% de la consommation d'énergie finale devant les appareils électriques (17%), l'eau chaude sanitaire (10%) et la cuisson (6%).

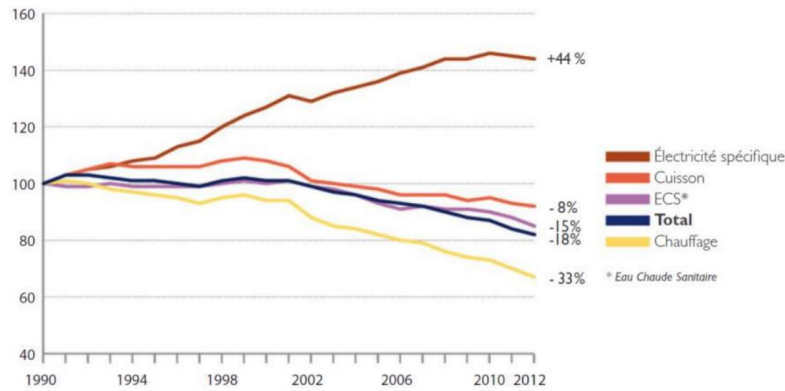


Figure 1-4- Répartition des évolutions des postes de consommation d'électricité en France (5)

### 1.4.2. Emissions du secteur du Bâtiment

Les émissions du secteur des bâtiments semblent s'être stabilisées au cours des dernières années, autour de 9,5 gigatonnes de CO<sub>2</sub> par an entre 2015-2017, soit 28% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie. Les émissions indirectes (c'est-à-dire les émissions issues de la production énergétique pour la consommation d'électricité et pour le chauffage commercial) représentent la majeure partie des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie dans le secteur des bâtiments, couvrant environ 70% des émissions totales liées à la consommation d'énergie des bâtiments en 2017.

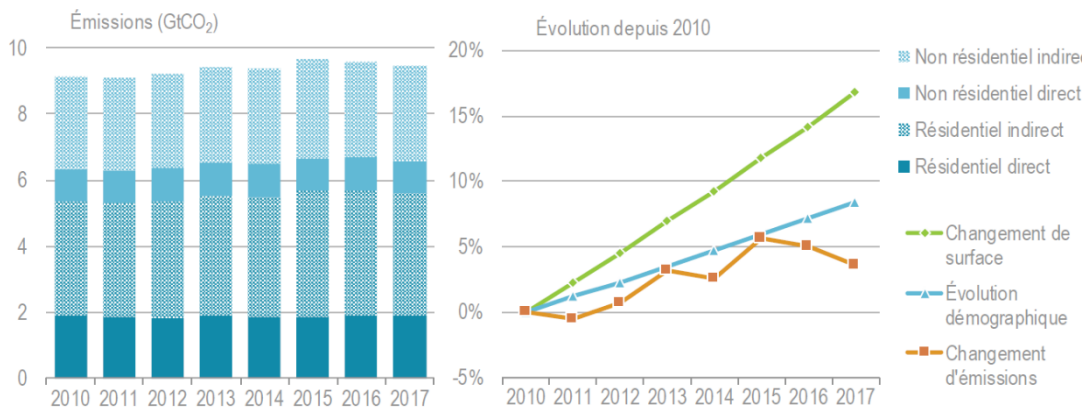


Figure 1-5- Evolution des émissions du secteur du bâtiment entre 2010 et 2017 (4)

## 2. SITUATION ENERGETIQUE MAROCAINE

### 2.1. Généralités

Le Maroc connaît, sur les dernières décennies, une dynamique de croissance qui fait progressivement changer son profil socio-économique. En effet, de 2000 à 2016, l'économie marocaine a connu environ 12,85% de croissance par an mesuré par le produit intérieur brut (6), alors que la population n'a augmenté que de 15% sur la même période.

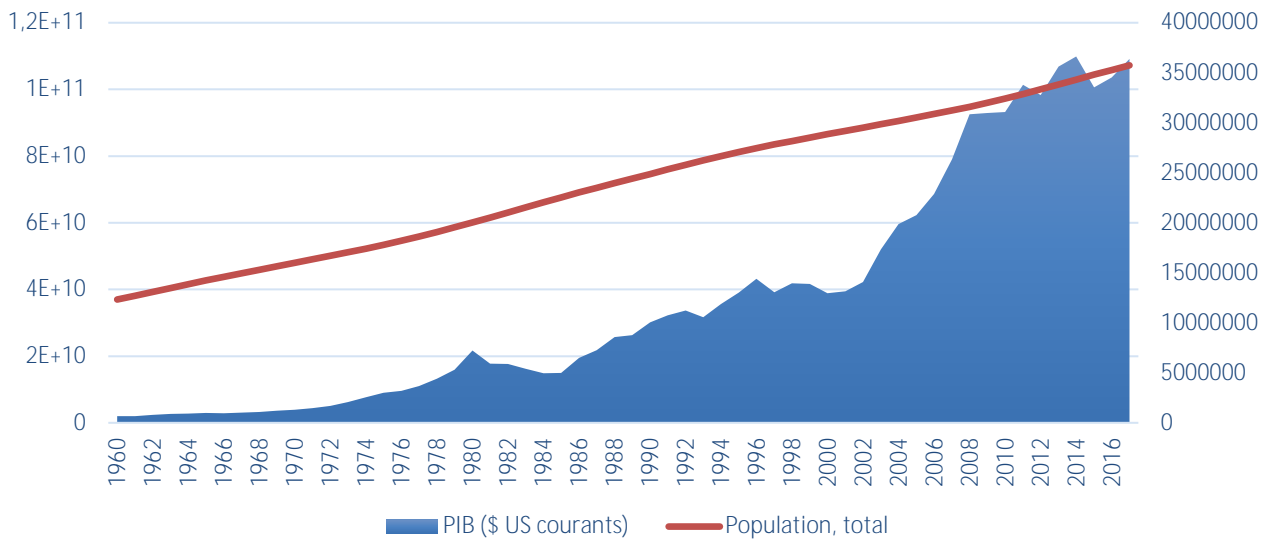


Figure 1-6- Evolution du PIB et de la population au Maroc depuis 1960 (6)

Cette croissance est accompagnée d'une hausse des besoins énergétiques du pays :

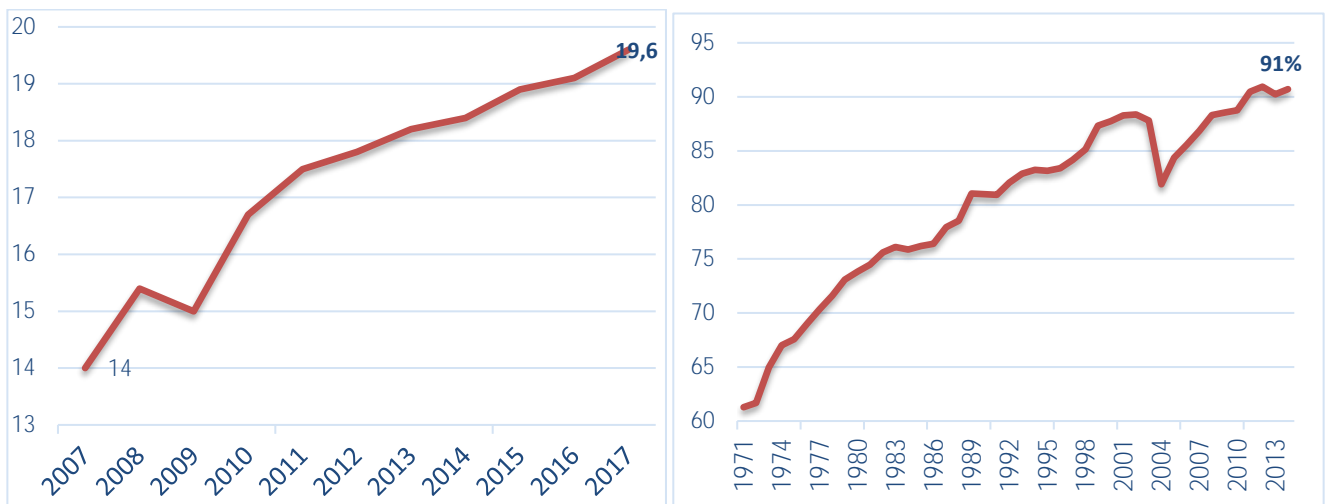


Figure 1-7 -Consommation d'énergie primaire entre 2007 et 2017 (Mtep) (7) Figure 1-8- Part de l'énergie importée au Maroc depuis 1971 (5)

La baisse en 2009 correspond aux répercussions de la crise financière mondiale, où le Produit intérieur brut mondial a chuté de 5,28% par rapport à 2008. Ce retard a vite été rattrapé en 2010. En outre, entre 2007 et 2017, les consommations marocaines ont augmenté de 40%. Pour satisfaire cette forte demande énergétique, le Maroc a recours à l'importation massive d'énergie. En effet, la part de l'énergie importée était de 91% en 2014 selon les données de la banque mondiale, ce qui implique une très forte dépendance à l'extérieur en matière d'énergie, et par conséquent une facture énergétique très lourde.

Le secteur de l'énergie apporte une importante contribution à l'économie marocaine. Il représente 7% du produit intérieur brut et génère 17,3 MMDH de recettes fiscales en 2009. Les investissements réalisés dans le secteur se sont élevés à 10 MMDH en 2009 contre 21 MMDH en 2008 (8).

Il est à noter que les orientations de la politique nationale de développement économique et social s'articulent autour des axes suivants :



- *Poursuite du soutien de la croissance économique en vue de créer de l'emploi et d'augmenter les revenus des citoyens ;*
- *Accélération du rythme des réformes et de la mise en œuvre des politiques sectorielles pour renforcer la compétitivité et l'attractivité du pays sur la base d'un effort mieux réparti sur le plan territorial ;*
- *Renforcement de la solidarité sociale en vue d'assurer une meilleure répartition des fruits de la croissance et d'améliorer les indicateurs de développement humain en particulier dans le monde rural et les zones montagneuses ;*
- *Elaboration et mise en œuvre de la charte nationale de l'environnement et du développement durable.*

## 2.2. Mix énergétique national

La répartition énergétique nationale est caractérisée par une forte utilisation du pétrole (66%). La part des énergies renouvelables est quant à elle estimée à 4%.

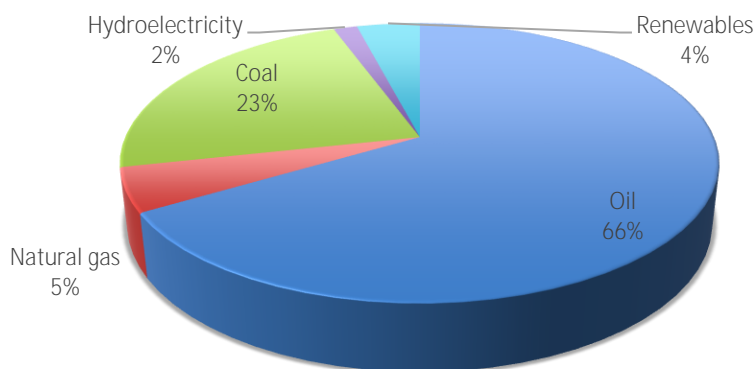


Figure 1-9- Energie primaire - Consommations en 2017 (Mtep) (9)

La figure suivante détaille l'évolution annuelle de la part renouvelable de cette production (y compris éolien, solaire, Géothermie, Biomasse et déchet). Nous remarquons une multiplication par 8 des consommations de source renouvelable entre 2010 et 2017, ce qui reflète la forte volonté du Royaume d'augmenter ses productions renouvelables.

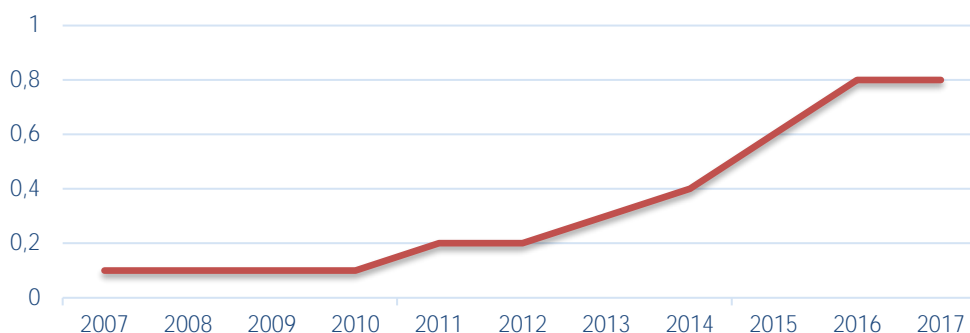


Figure 1-10- Consommation d'énergie primaire de source renouvelable (Éolien, solaire, Géothermie, Biomasse et déchets) au Maroc entre 2007 et 2017 (en Million de tonnes équivalent pétrole) (10)

En effet, le Maroc a décidé de développer des projets de grande envergure lancés par Sa Majesté le Roi Mohammed VI en 2009 et 2010.

« ...Convaincu de la nécessité de préserver l'avenir des générations futures, Nous n'avons cessé d'insister sur la concomitance des exigences de développement avec l'impératif d'assurer la protection de notre environnement, afin de garantir, à terme, les conditions d'un développement durable pour notre pays. Nous agissons, donc, avec détermination pour assurer la préservation, la gestion judicieuse et la valorisation de nos ressources naturelles au service de l'économie nationale. Dans la même démarche s'inscrit le programme ambitieux que nous avons lancé pour la production d'énergies renouvelables, éolienne et solaire, en vue de réduire nos importations en énergies conventionnelles et d'alléger le fardeau qu'elles représentent pour l'économie nationale... ».

**Discours de SM le Roi Mohammed VI à l'occasion de la Fête du Trône- Lundi 30 juillet 2012.**

### 2.3. Emissions de gaz à effet de serre

Au Maroc, les émissions de CO<sub>2</sub> sont estimées à 58,5 millions de tonnes en 2017 (hausse de 33,5% par rapport à 2007). La part des émissions de GES relatives au secteur de la production d'électricité est la plus importante (41%), suivie de celles relatives au secteur de transport avec une part de 29%.

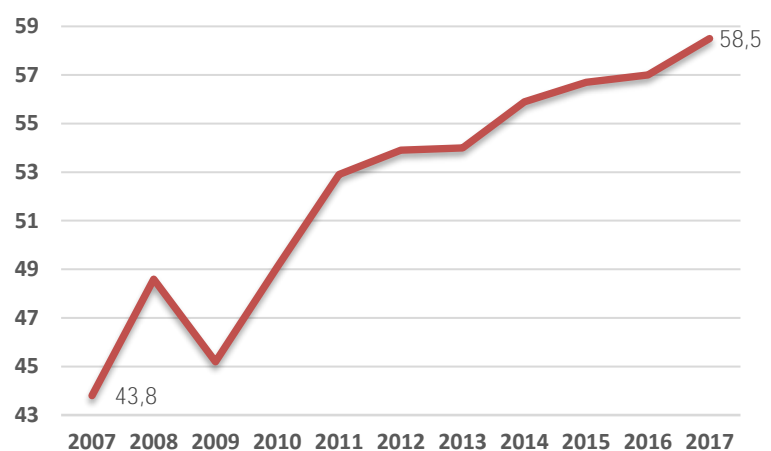


Figure 1-11- Evolution des émissions de dioxyde de carbone au Maroc entre 2007 et 2017 (Million de tonnes de dioxyde de carbone) (10)

Cela montre que le secteur de l'énergie représente pour notre pays le plus grand potentiel d'atténuation des émissions de GES. Les parts inhérentes aux autres secteurs, notamment le résidentiel, sont détaillées dans la figure suivante.

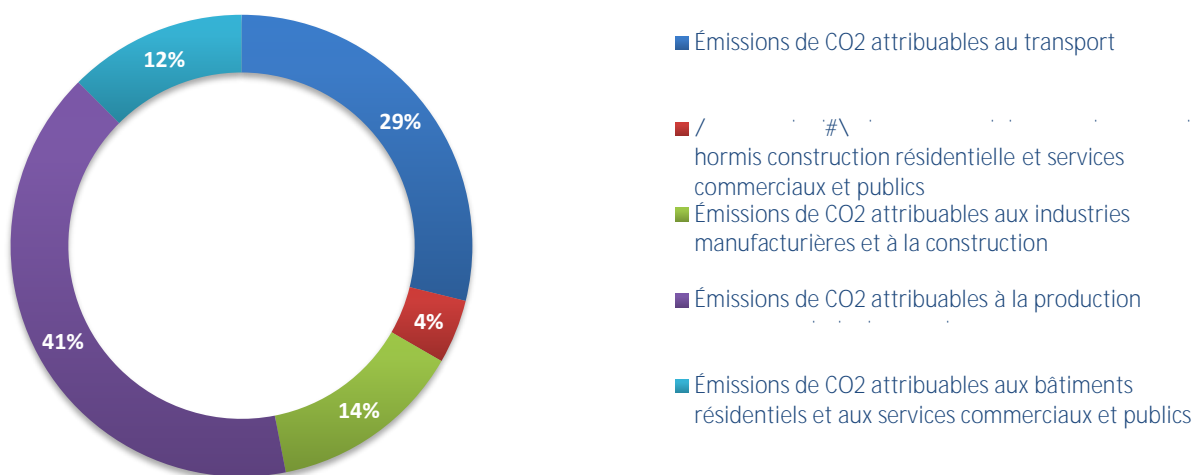


Figure 1-12- Répartition des émissions GES - Données banque mondiale pour l'année 2015 (7)

Pour conclure, les émissions de gaz à effet de serre continuent à évoluer dans notre pays malgré les efforts déployés dans l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables. Le Maroc est toutefois l'un des pays les moins émetteurs de gaz à effet de serre au niveau mondial.

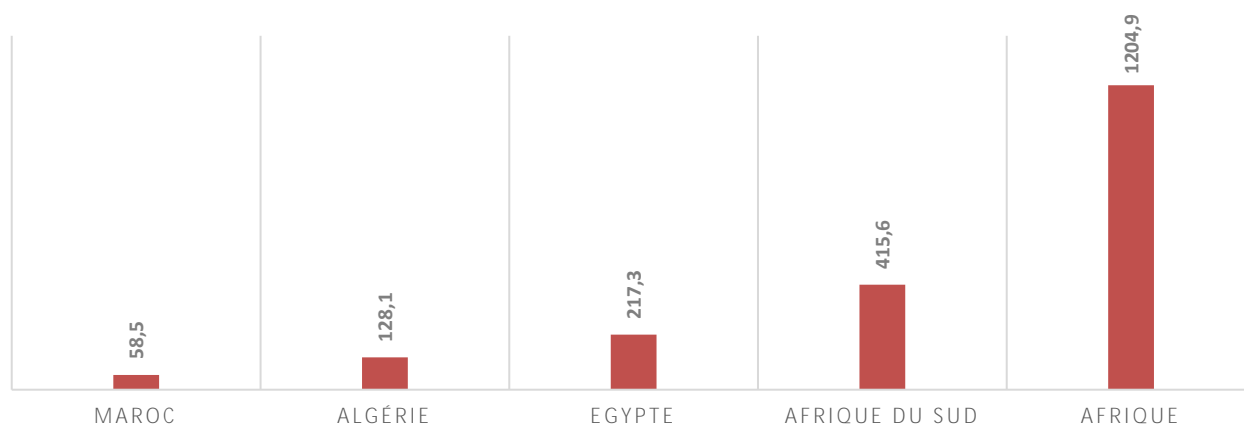


Figure 1-13- Comparatif des émissions des GES (7)

## 2.4. Secteur du Bâtiment au Maroc

### 2.4.1. Généralités

Le taux de participation du secteur du BTP à la croissance du PIB marocain ne cesse d'augmenter. En effet, la capitalisation boursière des valeurs pour le secteur du Bâtiment et des matériaux de construction était à 76 077 millions de dirhams en 2017 (11). La participation au produit intérieur brut du secteur du BTP s'est élevée à 59 130 millions de dirhams en 2017, contre 54 584 en 2015, soit une participation de 5,5% au PIB du pays. La part des entreprises des BTP dans les emplois continue à croître. En 2018, la part de la population active occupée par le secteur des BTP s'élevait à 10,8%, ce qui place le secteur comme le 4<sup>ème</sup> recruteur au pays derrière les secteurs de l'agriculture, forêt et pêche, transports et industrie (11).

### 2.4.2. Répartition des consommations

Au Maroc, le secteur du Bâtiment représente 25% de la consommation énergétique totale du pays. Il est deuxième consommateur d'énergie derrière le secteur du Transport.

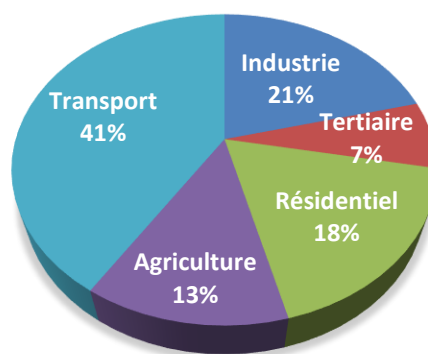


Figure 1-14- Consommations d'énergie par secteur au Maroc (12)

Cette consommation énergétique est appelée à augmenter rapidement à la suite de l'évolution du parc d'habitation induit par les grands chantiers nationaux programmés : plan Azur de l'hôtellerie, programme d'urgence de l'éducation nationale, programme de 150.000 logements par an, programme de réhabilitation des hôpitaux (8).

Le béton et le ciment sont des grands consommateurs d'énergie à cause de la fabrication de la chaux constituant nécessaire à la fabrication du ciment, utilisé partout.

Selon l'enquête « Panel des ménages » réalisée en 2012 par l'ONDH, les dépenses mensuelles destinées à l'habitation et à l'énergie, absorbent environ le quart du budget des ménages (budget de 1.552 DH par ménage).

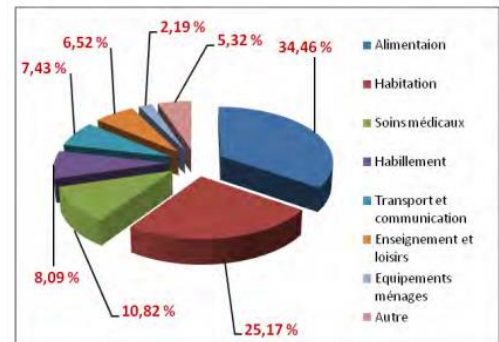


Figure 1-15 - Part des dépenses des ménages marocains (13)

Le budget énergie des ménages marocains constitue 20% des dépenses liées au logement. L'énergie utilisée dans les logements est estimée à (8) :

- 20 % pour l'eau chaude sanitaire,
- 10 % pour l'électroménager, l'éclairage et la télévision,
- 70 % pour la cuisson et le chauffage/climatisation.

### 2.4.3. Typologie des constructions marocaines

L'architecture marocaine est variée et a une longue histoire ; Elle est riche grâce à l'influence des variétés religieuses et culturelles de l'histoire du pays. Le cas des Ryads, en l'occurrence, témoigne de toute sa splendeur. La typologie du bâtiment marocaine est centrée principalement sur le développement des secteurs du résidentiel et du tertiaire.



Figure 1-16 - Ryad marocain

Les modèles de construction maintiennent ce qui est traditionnel au Maroc, qui s'adapte bien à une tendance qui vise à conjuguer les technologies modernes de construction des pays les plus avancés, avec les habitudes traditionnelles typiques de l'architecture marocaine. Le résultat final cherche un confort optimal des usagers, tout en respectant le patrimoine culturel marocain (14).

Dernièrement, le Maroc a fait un énorme effort pour la construction des logements économiques, dans le cadre de la lutte contre le logement insalubre. Il s'agit de logements moyen standing, ou logements sociaux (50-65 m<sup>2</sup>/logement), dont le développement est renforcé par certains programmes gouvernementaux (Villes sans bidonvilles...).

Tableau 1-1 - Classement des catégories des logements par prix

Catégorie du logement	VIT	Social	Economique et Moyen standing	Haut standing
Coût approximatif à l'acquisition (DH)	140'000	150'000	400'000 à 600'000	Plus de 600'000

En 2014, le parc de logements s'élevait à 8,86 millions d'unités d'habitation au Maroc, dont 69,8% (6,19 millions) en milieu urbain et 30,2% (2,68 millions) en milieu rural. Les logements occupés représentaient 79,8% (7,07 millions) du parc national, les logements vacants 12,3% (1,09 millions) et les logements secondaires ou saisonniers 8,0% (706,1 milles). En milieu urbain, ces proportions représentaient respectivement 74,8%, 15,9% et 9,3% (15).

L'effectif des logements urbains occupés a augmenté sur la période intercensitaire passant de 3.227.469 en 2004 à 4.627.110 unités en 2014. Ces logements occupés ont enregistré une augmentation de leur part en passant de 60,1% en 2004 à 65,4% en 2014. L'augmentation du poids s'explique essentiellement par le rythme de progression élevé de cette catégorie d'habitat, dont l'effectif a été multiplié par 1,4 pendant la période 2004-2014, soit une évolution intercensitaire de 43,4% et de 4,3% d'unités de plus par an (15).

Le haut-commissariat au Plan, producteur de l'information statistique économique, démographique et sociale au Maroc, publie annuellement « *le Maroc en Chiffres* », recensant les données annuelles de la population climat, emploi... Dans l'édition de l'année 2018, nous retrouvons les autorisations de construire en 2017.

Nous remarquons ainsi que l'habitation de type marocain est de loin le type d'habitat préféré des marocains, suivi par les appartements et les villas (11).

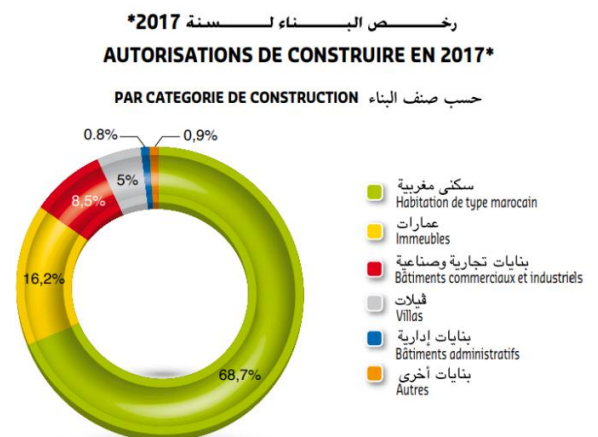


Figure 1-17- Autorisations de construire en 2017 (11)

Le secteur résidentiel marocain est généralement composé de six types de bâtiments :

- *La villa* construction isolée, généralement composée au plus de 2 étages et dotée d'un jardin.
- *L'appartement* en immeuble individualisé, il se trouve dans un même étage avec deux, trois ou plus d'appartements.
- *La maison marocaine traditionnelle* se trouve en général dans les anciennes médinas ; elle présente une cour centrale (patio) à l'intérieur qu'entourent des chambres d'habitation.
- *La maison marocaine moderne* : Construction d'une structure individualisée à un ou plusieurs étages.
- *La construction sommaire* ou *bidonville* C'est une construction très sommaire dans les bidonvilles, baraques. Faite avec des matériaux de récupération, aggloméré, pierre sèche.

- *L'habitat rural* : Généralement intégré dans le périmètre urbain, il garde des caractéristiques où l'activité agricole est dominante.

Tableau 1-2 - Répartition des ménages selon le type du logement et par milieu de résidence en 2004 et 2014

Type du logement	RGPH 2004			RGPH 2014		
	Urbain	Rural	Total	Urbain	Rural	Total
Villa/Etage de villa	3,3	0,3	2,2	4,5	0,8	3,2
Appartement	12,4	0,1	7,6	17,5	0,3	11,6
Maison marocaine traditionnelle	8,1	4,8	6,8	5,5	4,8	5,2
Maison marocaine moderne	62,6	13,6	43,4	65	25,9	51,6
Chambre dans un établissement	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
Bidonville/Sommaire	8,2	5,7	7,2	5,2	3,1	4,5
Local non destiné à l'origine à l'habitat	0,8	0,5	0,7	0,4	0,2	0,3
Logement rural	1,1	72,8	29,1	1,3	64	22,8
Autre	1,5	1	1,3	0,5	0,6	0,6
ND	1,6	1	1,3	-	0,1	0
<b>Total</b>	100	100	100	100	100	100
Effectif	3435134	2207055	5642189	4806322	2505634	7311956

Quant à la région du grand Casablanca - Settat, elle est caractérisée par une prépondérance de la maison marocaine moderne (50.1%) et des appartements (30%) :

Tableau 1-3- Répartition des ménages selon le type de logement à la région du grand Casablanca en 2014

Région	Villa, étage de villa	Appartement	Maison marocaine moderne	Maison marocaine traditionnelle	Bidonville, sommaire	Chambre dans établissement	Local non destiné à l'origine à	Logement rural	Autre	Total
GRAND CASABLANCA-SETTAT	5,6	30,0	50,1	2,5	9,7	0,2	0,4	0,9	0,6	1 213 998

### 3. ETAT DE L'ART DES REGLEMENTATIONS

Le présent paragraphe décrit l'état de l'art des normes, exigences réglementaires et labels en termes de performances énergétiques et thermiques dans le monde.

#### 3.1. Réglementations et Normes

##### 3.1.1. Réglementation américaine

L'« *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* » *ASHRAE* est une organisation internationale spécialisée dans le domaine de la thermique et de la climatisation (chauffage, ventilation, climatisation, production de froid). Elle a développé en 1974 la première norme de mesure sur les consommations énergétiques dans le bâtiment, ce qui a permis à cette société d'en créer plusieurs autres normes entre 1980 et 2013. En 1993, *ASHRAE* a développé

des normes pour les bâtiments du secteur résidentiel (1998, 2000, 2003, 2006, 2009, 2012). Le code 2009-IECC est le plus utilisé aux États-Unis (16).

### 3.1.2. Règlements français

En France, la première réglementation thermique a vu le jour en 1974 après le choc pétrolier, en vue de réduire la facture énergétique du pays. Cette réglementation n'a cessé d'évoluer au fil des années, avec des mises à jour en 1982, 1988, 2000, 2005, 2007 (bâtiments existants) et 2012 (réglementation existante pour les bâtiments neufs). Les exigences de cette réglementation sont ainsi de plus en plus importantes, avec une orientation vers les bâtiments à zéro énergie ou même à énergie positive (objectif de la future réglementation 2020).

#### 3.1.2.1. Les bâtiments neufs (RT 2012)

Cette réglementation ambitieuse, à la hauteur des enjeux environnementaux, s'applique, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2013, à tous les bâtiments neufs, qu'ils soient à usage d'habitation ou à usage tertiaire. Ainsi, tout maître d'ouvrage qui entreprend la construction d'un bâtiment soumis à permis de construire doit, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2013, s'assurer du respect de la réglementation thermique 2012 dès la conception de son projet.

La RT 2012 impose de respecter trois exigences de résultats :

- Exigence d'efficacité énergétique bioclimatique définie par le coefficient  $B_{biomax}$  ;
- Exigence de consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire ou coefficient  $C_{ep\ max} = 50\ kWh/(m^2/an)$  en moyenne ;
- Exigence d'un confort d'été assuré, calculé avec le coefficient  $Tic_{ref}$  qui représente la température intérieure à ne pas dépasser.

Une conception bioclimatique performante s'obtient en optimisant le bâtiment indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre. La conception bioclimatique consiste à tirer le meilleur profit de l'énergie solaire, abondante et gratuite. En hiver, le bâtiment doit maximiser la captation de l'énergie solaire, la diffuser et la conserver. Inversement, en été, le bâtiment doit se protéger du rayonnement solaire et évacuer le surplus de chaleur du bâtiment. La conception bioclimatique s'articule autour des 3 axes suivants :

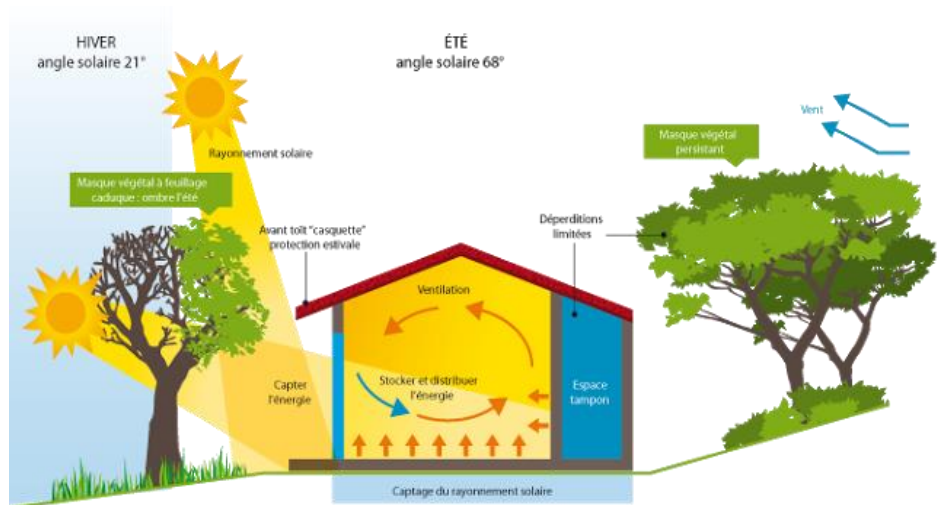


Figure 1-18 - Principes de base d'une conception bioclimatique (17)

- *Capter / se protéger de la chaleur*
- *Transformer, diffuser la chaleur*
- *Conserver la chaleur ou la fraîcheur*

L'optimisation des apports d'éclairage naturel, réduisant la consommation électrique d'éclairage est également un point essentiel de la conception bioclimatique.

Quelques exigences minimales de moyens ont été maintenues et la mise en œuvre d'un système d'attestations de prise en compte de la RT 2012 a été introduite au dépôt du permis de construire et à la réception du bâtiment.

### **3.1.2.2. Les bâtiments existants (RT 2007/2008)**

Les mesures réglementaires sont différentes selon l'importance des travaux entrepris par le maître d'ouvrage (18):

- Pour les rénovations lourdes de bâtiments (c'est-à-dire un coût des travaux de rénovation « thermique » supérieur à 25 % de la valeur hors foncier du bâtiment), de plus de 1 000 m<sup>2</sup>, achevés après 1948, la réglementation définit un objectif de performance globale pour le bâtiment rénové. Ce premier volet de la RT est applicable pour les permis de construire déposés à compter du 1<sup>er</sup> avril 2008 ;
- Pour tous les autres cas de rénovation, la réglementation définit une performance minimale pour l'élément remplacé ou installé. Ce second volet de la RT, dit « RT élément par élément » est applicable à partir du 1<sup>er</sup> novembre 2007.

### **3.1.2.3. Projet de la RT2020**

La RT 2020 va mettre en œuvre le concept de bâtiment à énergie positive, appelé aussi « *BEPOS* » au sein du Plan Bâtiment Durable. Cette réglementation sera une réglementation d'objectifs, laissant une liberté totale de conception, limitant simplement la consommation d'énergie.

Les bâtiments à énergie positive sont des bâtiments qui produisent plus d'énergie (chaleur, électricité) qu'ils n'en consomment. Ce sont en général des bâtiments passifs, très performants et fortement équipés en moyens de production énergétique par rapport à leurs besoins en énergie. Les murs, toits, voire fenêtres peuvent être mis à profit dans l'accumulation et la restitution de la chaleur ou dans la production d'électricité. L'excédent en énergie se fait grâce à des principes bioclimatiques et constructifs mais aussi par le comportement des usagers qui vont limiter leur consommation.

La réalisation d'habitat à énergie positive reprend les principes de la maison passive, en y incluant en plus des éléments de productions énergétiques tels qu'une ventilation avec la récupération de chaleur sur l'air vicié, une isolation thermique renforcée, une captation efficace de l'énergie solaire de façon passive, des fenêtres de haute qualité, la limitation des consommations énergétiques des appareils ménagers, la récupération des eaux pluviales (19).



### **3.1.3. Directive Européenne EPBD**

La Directive européenne *EPBD* (Energy Performance of Buildings) a fixé les grandes lignes de la politique européenne dans le secteur de la performance énergétique des bâtiments. Elle a introduit les notions de coût optimal (à prendre en compte lors de la définition des exigences par chaque pays) et de bâtiments *NZEB* (*Nearly Zero Energy Building*). On peut constater une certaine disparité concernant la transposition de la directive européenne. 25 des 28 pays membres ont déposé leur rapport sur le niveau de coûts optimaux. Selon le rapport d'avancement (20) d'octobre 2014, 13 pays membres ont élaboré une définition des bâtiments NZEB. Les autres pays à part la Grèce et la France ont une feuille de route pour cette définition. La Suisse et la Norvège, qui ne sont pas membres de l'Union Européenne, n'ont pas l'obligation de transposer la directive, mais leurs réglementations vont également évoluer vers des bâtiments NZEB à l'horizon 2020. La France considère le niveau de performance de la Réglementation Thermique 2012 comme le niveau *NZEB* en France.

### **3.1.4. La réglementation thermique en Espagne**

La réglementation thermique espagnole (DB HE) est élaborée conjointement par deux ministères et l'Institut pour l'Economie et la Diversification de l'Energie. Sa première implémentation date de 2006 et a été revue plusieurs fois depuis jusqu'à la version actuelle de 2013. Cependant, l'Espagne doit encore augmenter ses niveaux d'exigence pour être en accord avec la Directive européenne (21).

La réglementation thermique en Espagne concerne tous les bâtiments neufs ainsi que les bâtiments de plus de 1000 m<sup>2</sup> pour lesquels est effectuée une réhabilitation. Le DB HE fixe la consommation maximale en énergie primaire pour les bâtiments résidentiels neufs (ou extensions) pour le chauffage, le refroidissement et l'eau chaude sanitaire, modulée en fonction de la zone climatique et la surface utile. Pour l'exigence sur le bâti, les bâtiments neufs résidentiels ne doivent pas dépasser une certaine demande en énergie de chauffage, modulée de la même façon. Ces mêmes exigences s'appliquent aux bâtiments subissant une rénovation de plus de 25% de leur surface (une révision est nécessaire pour imposer des niveaux de performance énergétique à toutes les opérations de rénovation). Un chapitre est également dédié à l'efficacité énergétique des équipements d'éclairage.

Le code technique de la construction en Espagne impose la mise en place de panneaux solaires thermiques sur les bâtiments neufs, à usage de bureaux ou de logement. Ces panneaux peuvent représenter jusqu'à 70% de l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau, en fonction de la région où se trouve le bâtiment. Quant au photovoltaïque, les immeubles administratifs, comme les hôtels, les supermarchés ou les hôpitaux, doivent être équipés de panneaux solaires photovoltaïques, dont la capacité est fonction des régions et de la taille du bâtiment.

### **3.1.5. Pays du MAGHREB**

Il est à noter que la commission européenne avait financé en 1993 un projet de mise en place d'une réglementation thermique commune aux trois pays du Maghreb (22). Ce projet a été piloté par la Tunisie et il n'a pas abouti pour des raisons diverses, en particulier par manque de

volonté politique à l'époque. Dans ce qui suit, nous allons présenter un bref aperçu des projets de la réglementation thermique en Algérie et Tunisie.

### 3.1.5.1. Algérie

L'Algérie est le premier pays du Maghreb à réaliser une réglementation thermique des bâtiments à usage d'habitation et ce dès 1997. L'objectif était de réduire la consommation de chauffage de l'ordre de 25%. Une réflexion a été engagée ensuite pour porter ce niveau d'économie à plus de 40%. Pour ce faire, des simulations numériques ont été menées sur des logements types. Il a été déduit alors des différentes études réalisées qu'en agissant sur la seule limitation des déperditions thermiques par transmission, il est possible d'atteindre ce nouvel objectif tout en réduisant substantiellement la charge de climatisation d'été.

Sous le titre de Réglementation thermique des bâtiments d'habitation : *DTR C 3-2*, les règles de calcul des déperditions calorifiques définissent les performances thermiques minimales mais comprennent aussi des conventions de calcul ainsi que des conventions de dimensionnement des installations de chauffage. La réglementation algérienne autorise, dans certaines limites, le calcul informatisé des besoins de chauffage. Ceci est un point positif puisque cela permet de profiter de l'inertie thermique d'un bâtiment ce qui est un facteur très important étant donné le type de climat et les différents types de constructions existantes en Algérie (23).

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 :

- 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 ( $B_{dyn}$ ) 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  $B_{dyn}$ .

Concernant les besoins de climatisation, la réglementation propose une méthode de calcul basée sur le calcul des apports calorifiques des bâtiments. 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.

### 3.1.5.2. Tunisie

La politique d'efficacité énergétique tunisienne dans le secteur de la construction est l'une des plus élaborées dans les Pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée (*PSEM*). Elle s'appuie sur un cadre réglementaire évolutif qui a été développé depuis 2004 (Article n°10 de la loi n°2004-72 du 2 août 2004 relative à la maîtrise de l'énergie telle que modifiée par la loi n° 2009-7 du 9 février 2009). En 2008, l'arrêté d'application relatif au type de bâtiments à usage de bureaux a été

promulgué, suivi en 2009 par celui sur les bâtiments à usage résidentiel et en 2012, par ceux prévus pour les bâtiments à usage de santé et de tourisme.

Outre le cadre réglementaire, le programme tunisien de l'efficacité énergétique privilégie également le dispositif institutionnel (création de l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME) en 1986) et les incitations financières (Fonds national de maîtrise de l'énergie, lignes de crédits).

Tous les bâtiments à usage de bureaux (2008) et les bâtiments à usage résidentiel collectif (2009) sont assujettis à des spécifications thermiques minimales. L'application de cette réglementation est liée à l'octroi de l'autorisation de bâtir (24).

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.

Ces deux approches sont similaires aux approches de la réglementation thermique marocaine, présentée à la fin de ce chapitre.

### 3.1.6. Etat des réglementations dans quelques pays méditerranéens

Le benchmarking ci-dessous a été réalisé dans le cadre de l'élaboration de la réglementation thermique marocaine (12).

Tableau 1-4- Etat de l'art des réglementations dans les pays de la Méditerranée

Pays	Etat de la réglementation
Jordanie	Norme d'isolation thermique en 1990
	Code d'EE dans les bâtiments obligatoire (en cours d'adoption)
Liban	Norme d'isolation thermique en 2005, révisée en 2010
Syrie	Code d'EE dans les bâtiments, obligatoire en 2008
Turquie	Norme d'isolation thermique en 2000
	Norme obligatoire
Egypte	Norme d'isolation thermique obligatoire en 1998
	Code d'EE dans les bâtiments pour résidentiel obligatoire en 2003
	Code d'EE dans les bâtiments pour tertiaire volontaire en 2005

Nous remarquons que le Maroc enregistre un retard de normalisation par rapport aux pays du contour méditerranéen. La réglementation thermique des bâtiments au Maroc parue en 2014 a comme vocation de combler ce vide réglementaire.

### 3.1.7. Règlement thermique de construction marocain

La réglementation thermique marocaine est le fruit de la publication du décret n°2-13-874 du 15 octobre 2014 dans le bulletin officiel n°6306 le 06 novembre 2014 (25). Ce décret fixe les règles de performance énergétique des constructions, et concerne essentiellement les bâtiments neufs.

L'Agence de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (ADEREE), devenue Agence Marocaine de l'Efficacité Energétique (AMEE), est responsable de l'élaboration de cette réglementation. Cette dernière est très similaire à la réglementation thermique tunisienne présentée précédemment.

Pour réaliser la réglementation, le Royaume a été divisé en 6 zones climatiques sur la base des degrés-jours d'hiver et d'été. Nous allons étudier en détail cette division dans le chapitre II.

Les exigences de la réglementation ont ainsi été données par zone climatique, et selon le type du bâtiment (résidentiel, tertiaire etc.). Deux approches ont été proposées :

- Approche performantielle : cette approche définit les besoins énergétiques maximaux d'un bâtiment en kWh/m<sup>2</sup>/an, en fonction de sa zone climatique et de son type. Le calcul de ces besoins se fait conformément à la norme *NM EN 15265*. Les besoins de chauffage et de climatisation sont calculés sur la base de températures de consigne de chauffage et de climatisation de 20 et 26°C respectivement. Pour le résidentiel, les besoins maximaux sont donnés ci-dessous :

Tableau 1-5 - Résidentiel : spécifications techniques minimales kWh/m<sup>2</sup>/an

Zone climatique	Résidentiel
Agadir	Z1 40
Tanger	Z2 46
Fès	Z3 48
Ifrane	Z4 64
Marrakech	Z5 61
Errachidia	Z6 65

- Approche prescriptive : cette approche se base sur des exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments. Ces exigences sont spécifiées sur la base de la zone climatique et du taux global des baies vitrées (TGBV).

Le respect des exigences du règlement thermique pour les bâtiments résidentiels devrait permettre une réduction significative des besoins de chauffage et de climatisation par rapport à la situation de référence (12). Le gain sur la facture énergétique relative au chauffage et la climatisation est estimé en moyenne à 18 Dh/m<sup>2</sup>/an.

## CONCLUSION

Au niveau mondial, le secteur du bâtiment représente à lui seul autour de 35% de la consommation d'énergie finale et contribue au tiers des émissions des gaz à effet de serre.

Ce poids conséquent du secteur a été pris en considération par la mise en place, dès le choc pétrolier des années 70, de réglementations thermiques et des labels visant à améliorer l'efficacité énergétique dans le domaine. Le Maroc a cependant eu un retard réglementaire dans la matière. Ce retard a été rattrapé, dès l'année 2014, par la mise en place de la réglementation thermique dont les exigences sont obligatoires pour les bâtiments neufs.

Nous allons présenter dans les deux chapitres suivants les différents outils qui seront utilisés dans le cadre de notre thèse, pour participer à ces efforts mondiaux d'optimisation des performances énergétiques des bâtiments.

# Chapitre 2 - Présentation des logiciels, analyse des données météorologiques et des données de construction

---

## 1. INTRODUCTION

Dans l'analyse thermique d'un bâtiment, un outil en dynamique est nécessaire pour modéliser le stockage de chaleur et évaluer les gains solaires utiles.

Le principe d'un calcul de simulation thermique dynamique d'un bâtiment consiste à étudier, sur une année entière ou sur une période définie d'au moins quelques jours, au pas de temps horaire ou à un pas de temps inférieur, le comportement thermique d'un bâtiment (26).

## 2. LES OUTILS DE SIMULATION DES BATIMENTS A FAIBLE CONSOMMATION ENERGETIQUE

### 2.1. Etat de l'art des outils

Ces dernières décennies, plusieurs centaines d'outils de simulation du comportement énergétique des bâtiments ont été développés à travers le monde. Le répertoire des outils élaboré par le Ministère de l'Énergie des États-Unis est là pour l'attester : 398 outils liés à l'évaluation de l'efficacité énergétique, aux énergies renouvelables ou au développement durable des bâtiments y sont recensés. Les principaux objectifs de ces outils sont de proposer et de justifier une disposition architecturale, un type de matériau ou une stratégie de ventilation optimisant le confort et diminuant les consommations d'énergie (27).

Ces outils peuvent prendre des formes diverses : bases de données, feuilles de calcul, outils d'analyse de composants ou de systèmes et logiciels de simulation des performances énergétiques de bâtiments dans leur ensemble. La majorité de ces outils a été développée initialement pour calculer les besoins thermiques de chauffage et refroidissement d'un bâtiment, sur la base des caractéristiques de l'enveloppe. Le Groupe de travail *APOGEE* sur la garantie de performance énergétique intrinsèque (*GPEI*) a réalisé une revue de comparaison des logiciels de simulation énergétique dynamique (28). Les logiciels les plus utilisés dans les travaux de recherche dans l'efficacité énergétique des bâtiments sont selon cette étude : *TRNSYS*, *EnergyPlus* / *ArchiWIZARD*, *Esp-r*, *Matlab/Simulink* et *PHPP*. Dans le cadre de ce mémoire, nous préconisons l'utilisation du logiciel *TRNSYS*.

### 2.2. Présentation de l'outil TRNSYS

Référence mondiale proposée par le CSTB, le logiciel TRNSYS est spécialisé dans la simulation thermique dynamique appliquée au bâtiment. Le logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment et de son équipement (systèmes de chauffage, climatisation) pour mener une étude mono ou multi-zone détaillée de son comportement thermique. TRNSYS intègre les variables d'emplacement, de matériaux de construction, d'architecture globale, de concept énergétique choisi, y compris les plus complexes tels que les systèmes solaires

innovants. TRNSYS est utilisé dans la recherche, les bureaux d'études, par les fabricants et aux fournisseurs de gaz et électricité de simuler les performances thermiques d'un bâtiment etc.

Différents auteurs marocains ont utilisé *TRNSYS* dans leurs travaux de recherche dans l'efficacité énergétique des bâtiments ; R. Idchabani a réalisé une étude de modélisation et d'optimisation de l'isolation thermique, en comparant les résultats de simulations dynamiques sous *TRNSYS* à une formulation simple des besoins thermiques en fonction du taux de vitrage, du renouvellement d'air et des apports de chaleurs utiles (29). Sick et al. (30) ont réalisé les études paramétriques de la réglementation thermique marocaine sous le logiciel *TRNSYS*, en vue de proposer les différentes exigences réglementaires pour les constructions neuves au Maroc. La réglementation marocaine propose également aux concepteurs des bâtiments au Maroc de vérifier la conformité réglementaire, à travers la méthode performantielle, avec un outil de simulation thermique dynamique comme *TRNSYS*.

Les données météorologiques des sites étudiés constituent l'un des paramètres d'entrée les plus essentiels pour réaliser les simulations thermiques dynamiques sous *TRNSYS*. Ces données sont généralement importées d'un autre outil. Dans la suite, nous utilisons le logiciel *Meteonorm* pour la génération de ces dernières.

### 2.3. **Meteonorm**

*Meteonorm* est un recueil complet de données météorologiques. Il contient des algorithmes permettant de créer - à partir des valeurs mesurées - des fichiers météo depuis n'importe quel endroit sur le globe. Les modèles d'interpolation élaborés à partir du module *Meteonorm* permettent un calcul fiable du rayonnement solaire, de la température et des paramètres supplémentaires pour n'importe quel site dans le monde (31). Ce logiciel s'adresse aux ingénieurs, architectes, enseignants, concepteurs et toute personne qui s'intéresse à l'énergie solaire et à la climatologie. La bibliothèque du logiciel *Meteonorm 7* contient environ 25 stations météo de villes marocaines, et il est possible d'obtenir les données météorologiques de n'importe quelle ville à travers les algorithmes d'interpolation du logiciel, sur la base des données météo des stations environnantes.

Ce logiciel nous permettra d'étudier les données météorologiques de plusieurs villes du royaume, avec les données météorologiques des années précédentes et également avec des prédictions des températures futures avec différents scénarios du GIEC.

## 3. ANALYSE DES DONNEES METEOROLOGIQUES MAROCAINES

### 3.1. Présentation

Nous allons présenter dans ce paragraphe les données pour 21 villes marocaines. Les villes de référence pour les différentes zones climatiques, selon la réglementation thermique marocaine, sont données dans les titres des paragraphes suivants.

L'étendue en superficie des zones climatiques n'est pas identique ; la plus petite zone est la zone 5 et la plus étendue est la zone 6. Il est à noter que selon (32), les zones climatiques ne sont pas égales du point de vue du parc de logements qu'elles concentrent sur leur territoire et que la zone 1 totalise 49% environ du parc national.

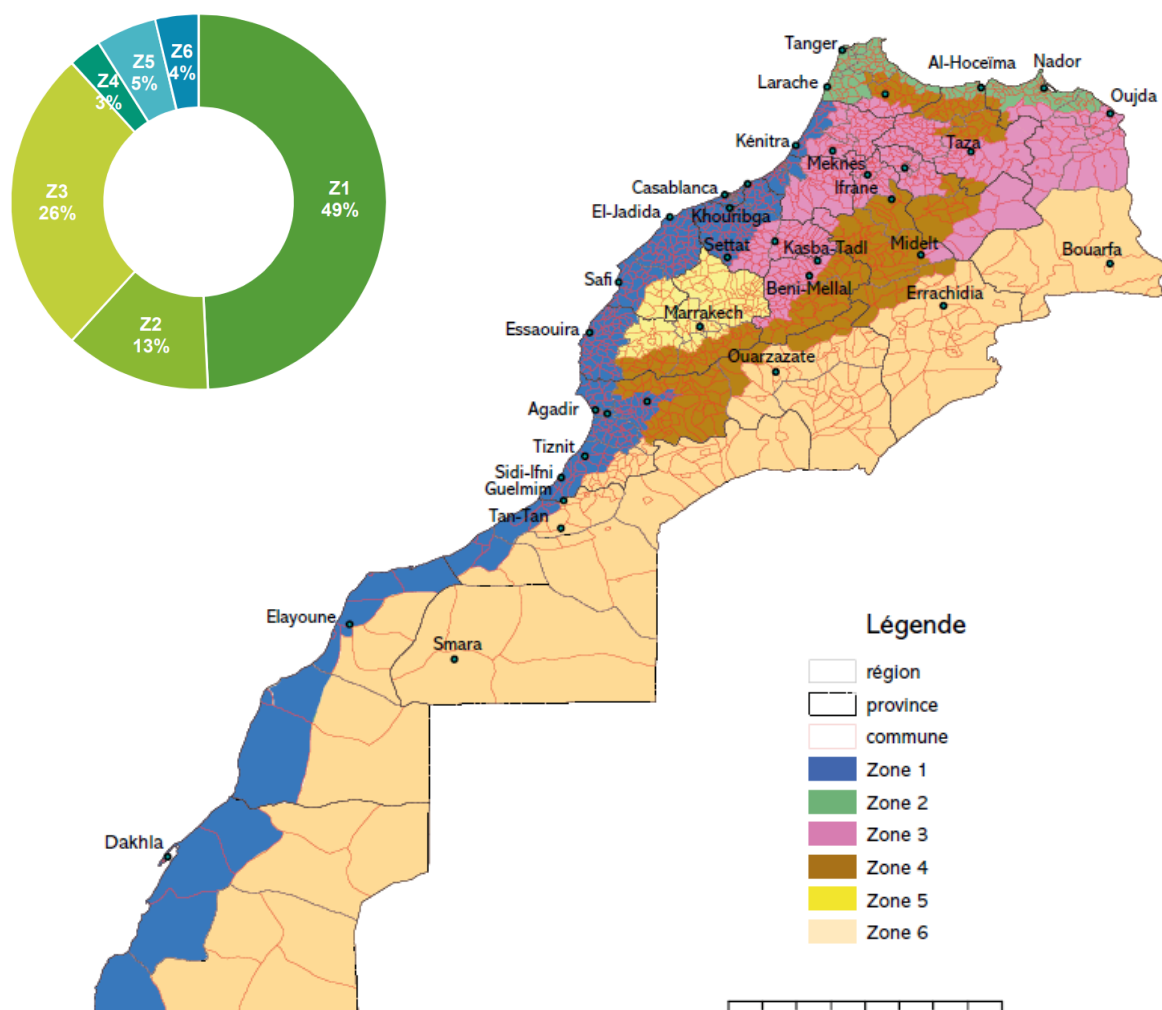


Figure 2-1 - Zone climatique de la réglementation thermique marocaine (12) & répartition du parc de logement par zone climatique

Les figures suivantes détaillent les températures extérieures annuelles de ces zones, réparties sur les 24h de chaque journée. L'axe des abscisses correspond au 356 jours de l'année, et celui des ordonnées aux heures (de 0 à 24) de chaque jour de l'année. Nous avons gardé la même échelle de couleurs pour les différents graphiques de températures (entre -5 et 45°C), afin de pouvoir facilement les comparer visuellement. Les données heure par heure proviennent de Meteonorm et leur traitement se fait avec un algorithme sous Python, afin de permettre d'avoir l'affichage ci-dessous.

### 3.1.1. Zone 1 : Agadir

Comme vu dans la figure précédente, la zone 1 totalise à elle seule la moitié du parc de logement marocain environ. Elle s'étend sur la façade atlantique du royaume.



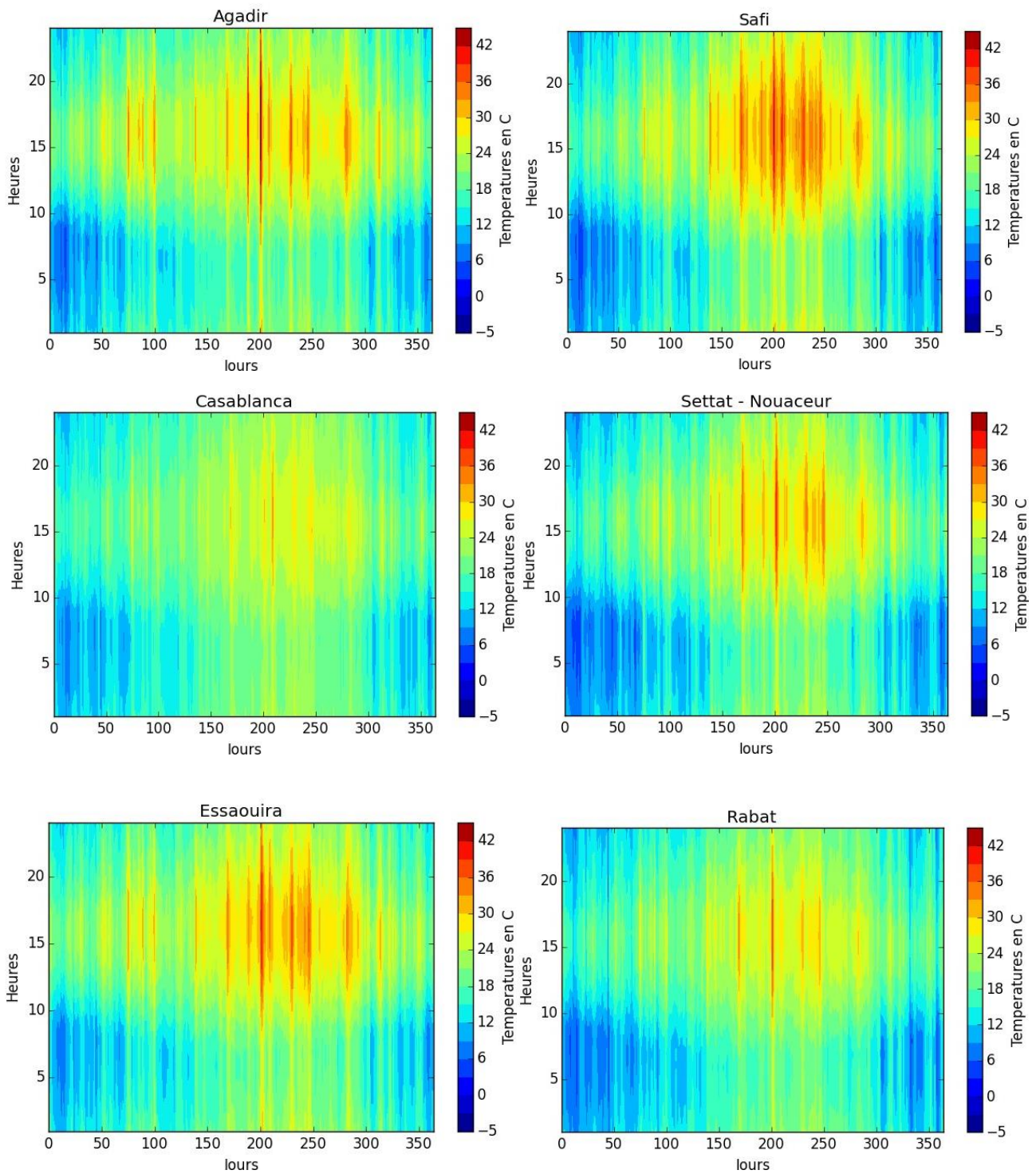


Figure 2-2 - Températures annuelles des villes de la zone 1

Nous remarquons que la ville de Casablanca présente des températures plutôt homogènes toute l'année. Pour la ville de Settat, nous présentons dans la figure ci-dessous l'évolution de l'amplitude journalière de température (température maximale de la journée - température minimale de la journée) à la ville de Settat. Cette amplitude oscille entre 3 à 18°C. Il est intéressant de profiter de l'inertie thermique des bâtiments compte tenu de ces amplitudes.

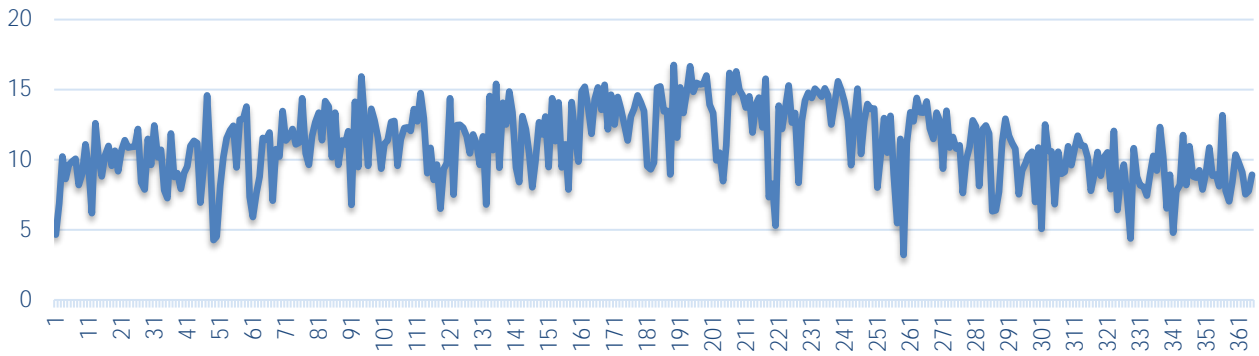


Figure 2-3 - Amplitude journalière en °C de la température ambiante à Settat

### 3.1.2. Zone 2 : Tanger

La zone 2 s'étend sur la façade méditerranéenne du royaume.

Les villes des zones 1 et 2 ont des climats assez confortables ; les hivers ne sont pas très rigoureux et les étés pas très chauds. Le climat modéré des villes de ces zones est justifié par l'humidité de l'air élevée dû à la proximité de la mer Méditerranéenne ou de l'océan Atlantique.

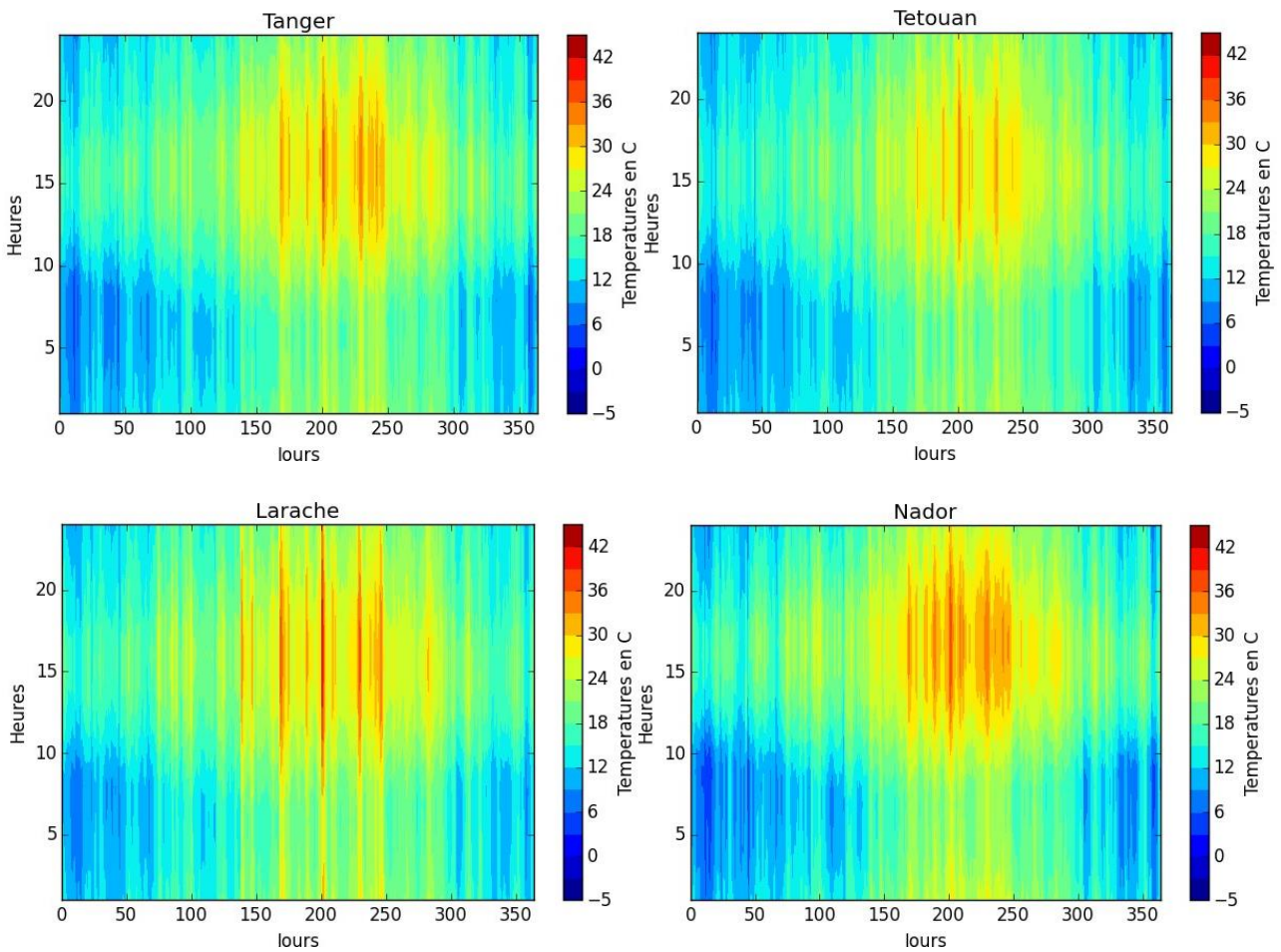


Figure 2-4- Températures annuelles des villes de la zone 2

### 3.1.3. Zone 3 : Fès

Les villes de la zone 3 sont caractérisées par un été très chaud (à Beni Mellal les températures estivales peuvent avoisiner les 46°C). L'hiver est moyennement froid du fait des masses d'air provenant de l'Atlas.

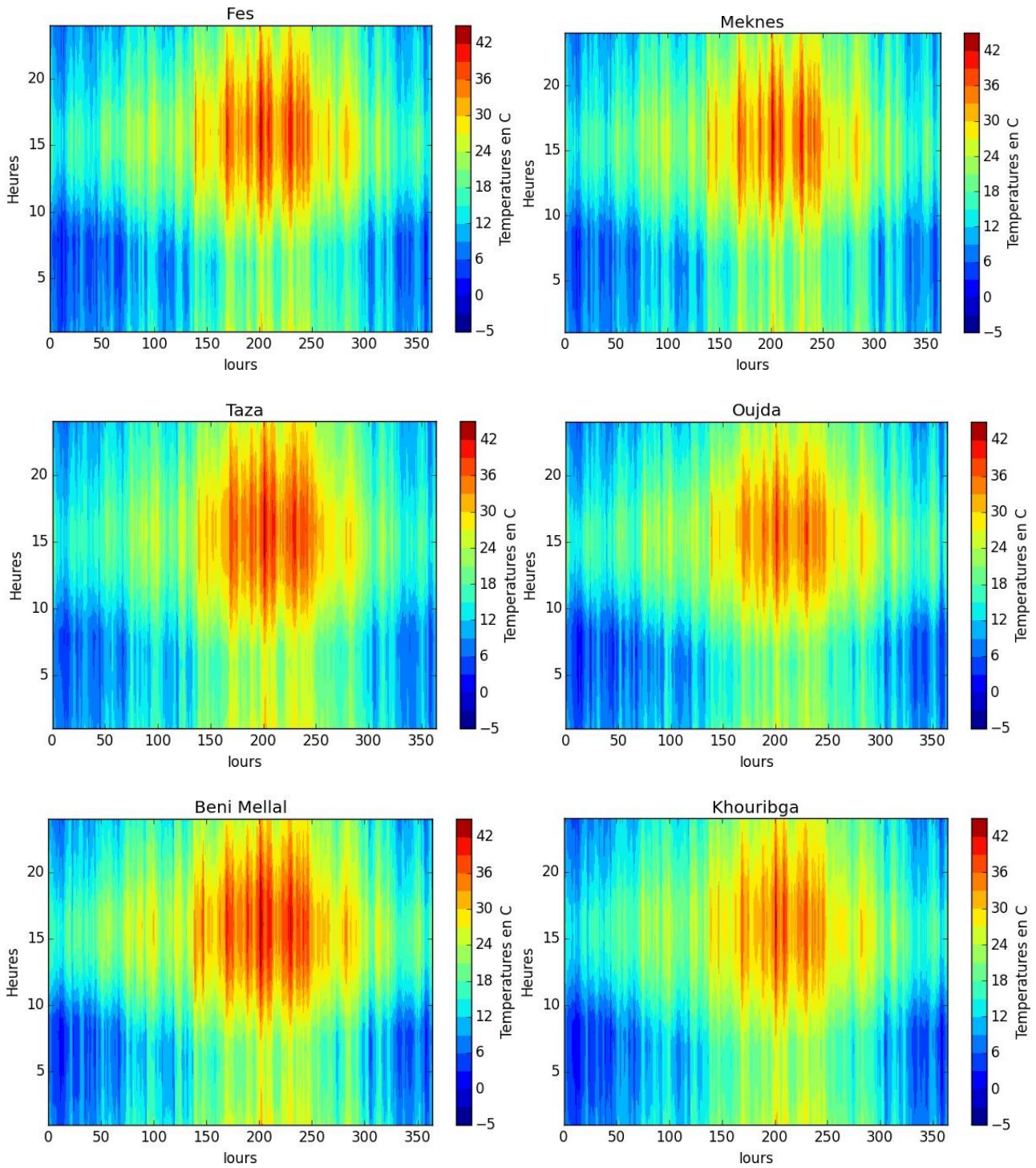


Figure 2-5 - Températures annuelles des villes de la zone 3

### 3.1.4. Zone 4 : Ifrane

La zone d'Ifrane présente les températures les plus douces en hiver. A Midelt, les températures descendent sous la barre des  $-5^{\circ}\text{C}$ . La ville d'Ifrane est située dans les montagnes du moyen Atlas à 1665 m d'altitude. En été, la température maximale est légèrement supérieure à  $26^{\circ}\text{C}$ .

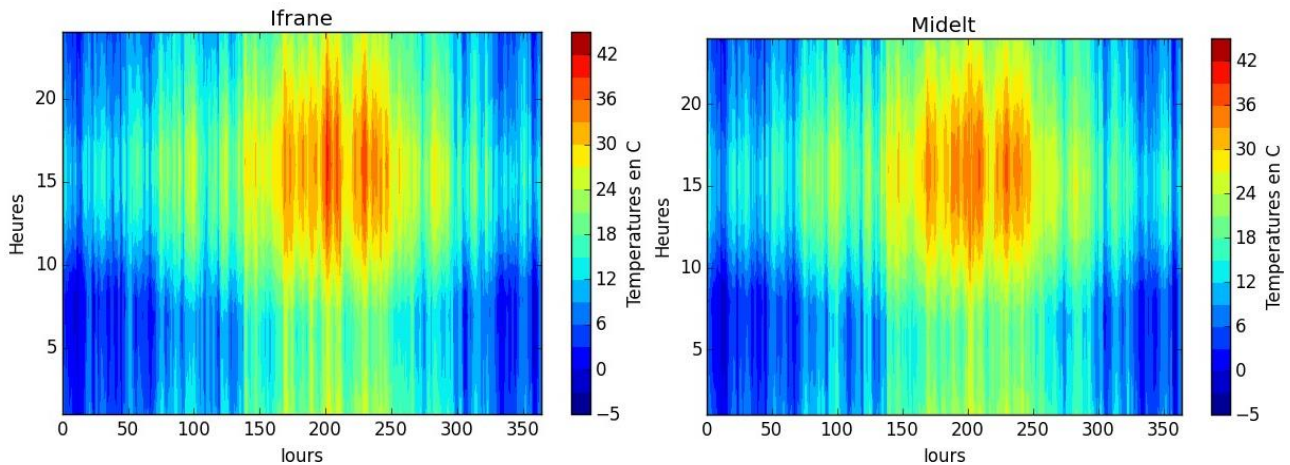


Figure 2-6 - Températures annuelles des villes de la zone 4

### 3.1.5. Zone 5 : Marrakech

La ville de Marrakech dispose d'un climat semi-aride. Il s'agit d'un climat méditerranéen atténué par la proximité du Sahara. Les étés, quant à eux, sont souvent torrides, avec des températures moyennes de  $28^{\circ}\text{C}$ . En journée, il n'est pas rare que les températures dépassent la barre des  $40^{\circ}\text{C}$ .

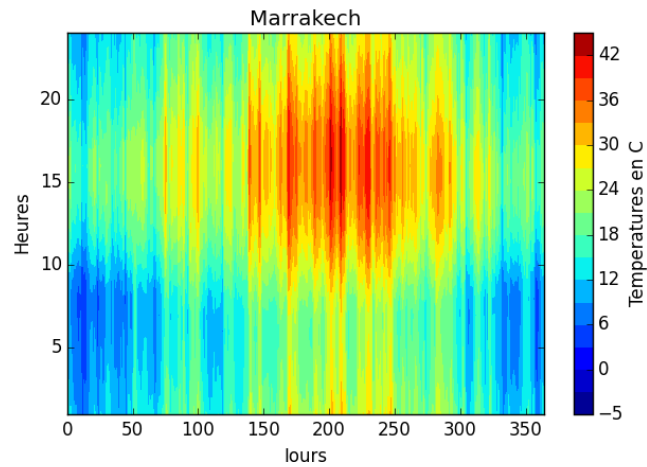


Figure 2-7 - Températures ambiantes - Marrakech

### 3.1.6. Zone 6 : Er-Rachidia

Il s'agit de la zone avec les températures les plus élevées en été. La ville d'Errachidia est caractérisée par une forte amplitude de température. En été, la température est souvent supérieure à  $26^{\circ}\text{C}$ . Ces caractéristiques sont dues principalement à sa localisation entre le haut Atlas et le Sahara.

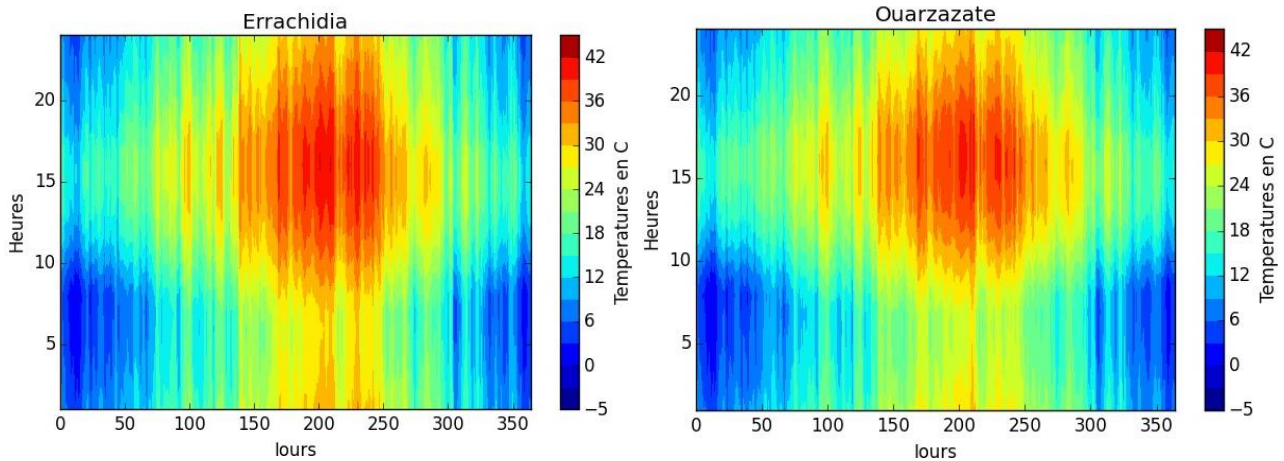


Figure 2-8 - Températures ambiantes - Zone 6

Cette analyse des données météorologiques du royaume permet de constater que le pays a un climat très varié et dépendant des zones climatiques. Ces données climatiques seront exploitées dans les cas d'étude du chapitre 4 de ce mémoire.

## 3.2. Irradiations solaires globales

### 3.2.1. Le rayonnement solaire

Le soleil dégage autour de lui une énergie de 66 millions de  $W/m^2$ , produite par des réactions nucléaires en chaîne. Seule une fraction de cette énergie atteint les limites de notre atmosphère. Elle vaut  $1353 W/m^2$  et est appelée constante solaire (33).

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que cette valeur car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement *diffus*. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement *direct* et du rayonnement *diffus*.

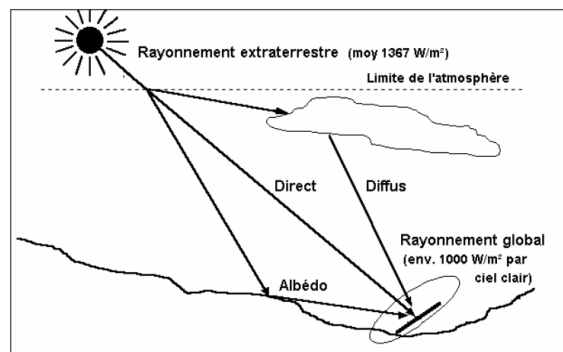


Figure 2-9 - Rayonnements direct, global et diffus

L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc. Le spectre solaire se répartit selon trois types de rayonnement :

- Les ultraviolets (*UVA* et *UVB*) qui ont une longueur d'onde comprise entre 280 et 380 nm. Ils représentent environ 5 % de la quantité totale du rayonnement solaire.
- La partie visible du spectre. Il s'agit de la partie du rayonnement solaire compris entre 380 et 700 nm. C'est dans ce domaine visible que l'énergie solaire est la plus intense. Elle représente 50 % de la quantité totale du rayonnement solaire.

- Les infrarouges (*IRA* et *IRB*) qui correspondent aux longueurs d'ondes comprises entre 700 et 2500 nm. Ils représentent environ 45 % du spectre solaire (34).

### 3.2.2. Les irradiations solaires des différentes villes

Le tableau ci-dessous représente les irradiations globales par villes, triées en sens croissant, selon les données des stations de *Meteonorm* ;

Tableau 2-1 - Irradiations globales par ville

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total
Tétouan	90	90	143	170	205	237	244	211	160	130	98	79	1854
Casablanca	91	107	155	188	216	217	220	204	169	129	94	78	1866
Nador	95	99	149	183	207	225	233	208	166	132	102	87	1885
Settat	98	106	159	186	215	223	235	213	169	133	100	87	1925
Al Hoceima	97	101	154	184	213	235	246	215	168	132	101	87	1931
Fès	99	103	161	183	206	231	246	224	169	140	102	90	1953
Rabat	94	105	160	191	221	230	237	217	174	136	102	86	1955
Kenitra	92	104	163	194	225	234	241	220	173	138	101	86	1970
Ifrane	101	99	162	184	206	240	247	230	174	141	102	87	1971
Tan-Tan	125	129	179	194	210	188	187	182	171	157	131	119	1972
Oujda	96	105	157	183	220	236	251	226	174	140	104	89	1981
Meknès	100	105	164	187	213	235	249	227	174	142	104	90	1989
Larache	87	104	161	195	230	243	252	226	180	139	100	82	1998
Tanger	89	104	161	196	230	247	256	228	178	138	99	80	2005
Beni Mellal	108	108	169	192	218	231	240	221	174	144	111	99	2016
Agadir	123	122	176	202	233	216	210	187	167	148	122	110	2016
Taza	102	109	168	191	222	243	246	224	177	144	106	93	2024
Essaouira	114	116	175	202	232	225	231	208	174	144	114	100	2034
Safi	110	115	174	203	228	229	235	214	177	143	111	99	2038
Marrakech	116	118	179	202	226	233	242	222	178	150	118	107	2090
Khouribga	108	112	174	199	229	245	257	234	182	147	112	97	2094
<b>Midelt</b>	119	128	188	208	233	242	226	217	183	151	120	106	2121
<b>Er-Rachidia</b>	124	130	196	219	246	248	247	234	189	156	124	111	2226
<b>Ouarzazate</b>	132	136	201	225	255	248	241	225	190	163	130	119	2265

Nous remarquons que les deux villes de la zone 6 (Er-Rachidia et Ouarzazate) présentent les irradiations annuelles les plus élevées. Il est à noter que les fameuses centrales solaires *NOOR* sont situées à proximité d'Ouarzazate. Le projet Noor Ouarzazate III a été livré fin de l'année 2018. Le prochain challenge du Maroc dans le domaine solaire sera de développer le projet Noor Midelt. Il sera hybride, c'est-à-dire photovoltaïque et CSP (thermodynamique à concentration).

La figure ci-dessous montre, à titre comparatif, l'évolution de l'irradiation solaire sur plan horizontal par heure et par jour à Settat (Nouaceur) et à Ouarzazate.

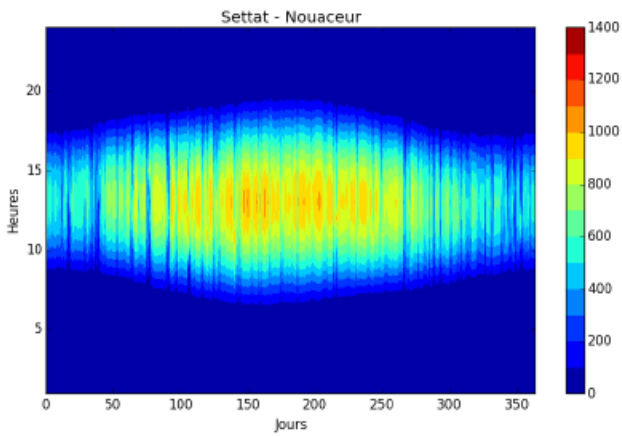


Figure 2-10 - Irradiation solaire à Settat

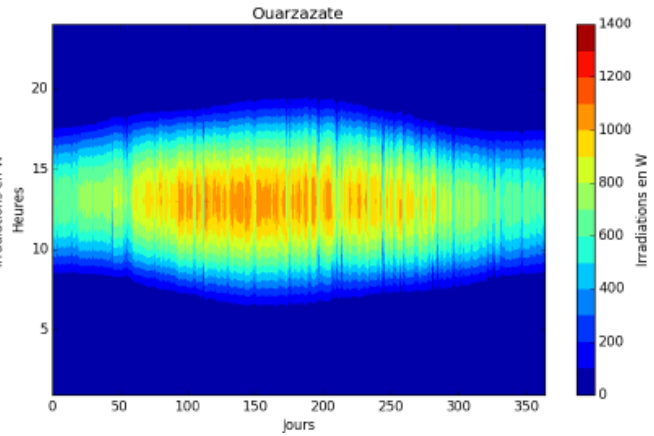


Figure 2-11 - Irradiation solaire à Ouarzazate

### 3.3. Méthode des Degrés jours

Au niveau du RTCM, l'élaboration de la carte de zonage climatique a été réalisée via la méthode des degrés-jours. Le calcul des degrés-jours, réalisé par la direction de la métrologie nationale, a été fait en considérant :

- *Les degrés-jours de chauffage à base de 18°C et les degrés-jours de climatisation à base de 21°C ;*
- *Les résultats des simulations d'un bâtiment représentatif dans 11 villes du Maroc.*

Pour le chauffage, le degré-jour (DJCH) se calcule en soustrayant à la température ambiante mensuelle moyenne de la température de base 18°C. La température de référence utilisée est 18°C puisqu'en moyenne, selon le RTCM, quand la température extérieure tombe sous cette barre, on doit chauffer l'intérieur pour y maintenir une température agréable. Lorsque la température extérieure est de 18 °C, les gains internes peuvent augmenter la température intérieure au-dessus de 20°C et on n'a pas besoin de chauffer.

Par exemple pour le mois de janvier, le calcul se fait comme suit :

$$DJCH \text{ (du mois Janvier)} = (18 - T_{\text{moy du mois de Janvier}}) \times 31$$

Les valeurs négatives ne sont pas considérées. Les degrés-jours annuels sont ainsi :

$$DJCH = \sum (\text{des degrés} - \text{Jours des 12 mois})$$

Le même calcul est réalisé pour les degrés-jours de climatisation, avec 21°C comme température de référence. En effet, lorsque la température extérieure est 21°C, les gains internes peuvent augmenter la température intérieure au-dessus de 24°C-26°C et impliquent des besoins de climatisation (35).

Le zonage climatique unique ci-dessous a ainsi été ainsi réalisé pour la réglementation thermique.

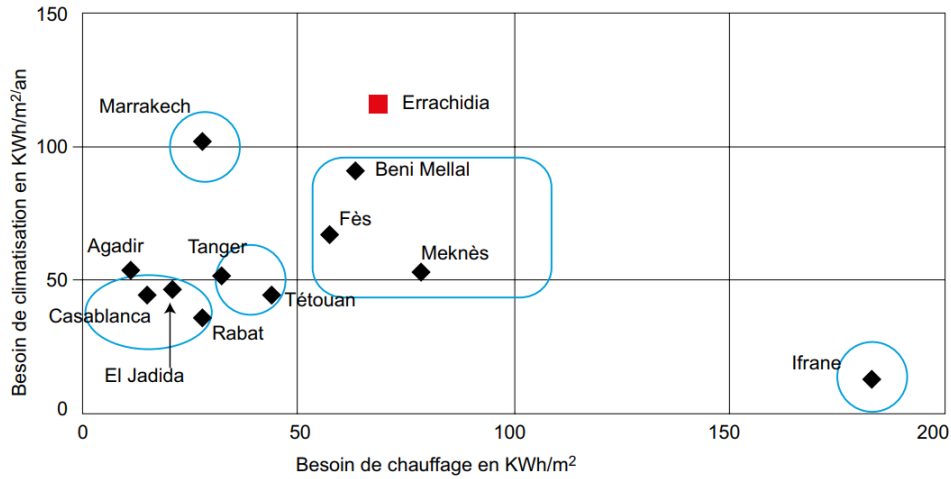


Figure 2-12 - Besoins énergétiques spécifiques de chauffage et climatisation (12)

Nous allons comparer le zonage de la réglementation avec la méthode des degrés-jours à pas horaire, calculés comme ci-dessous :

$$HDD = \sum_{k=1}^{365} \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (18 - T_i) \quad \text{et} \quad CDD = \sum_{k=1}^{365} \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (T_i - 21)$$

Les valeurs négatives ne sont pas retenues dans le calcul des HDD et des CDD. Nous réalisons le calcul sur la base des données horaires obtenues sur Meeonorm.

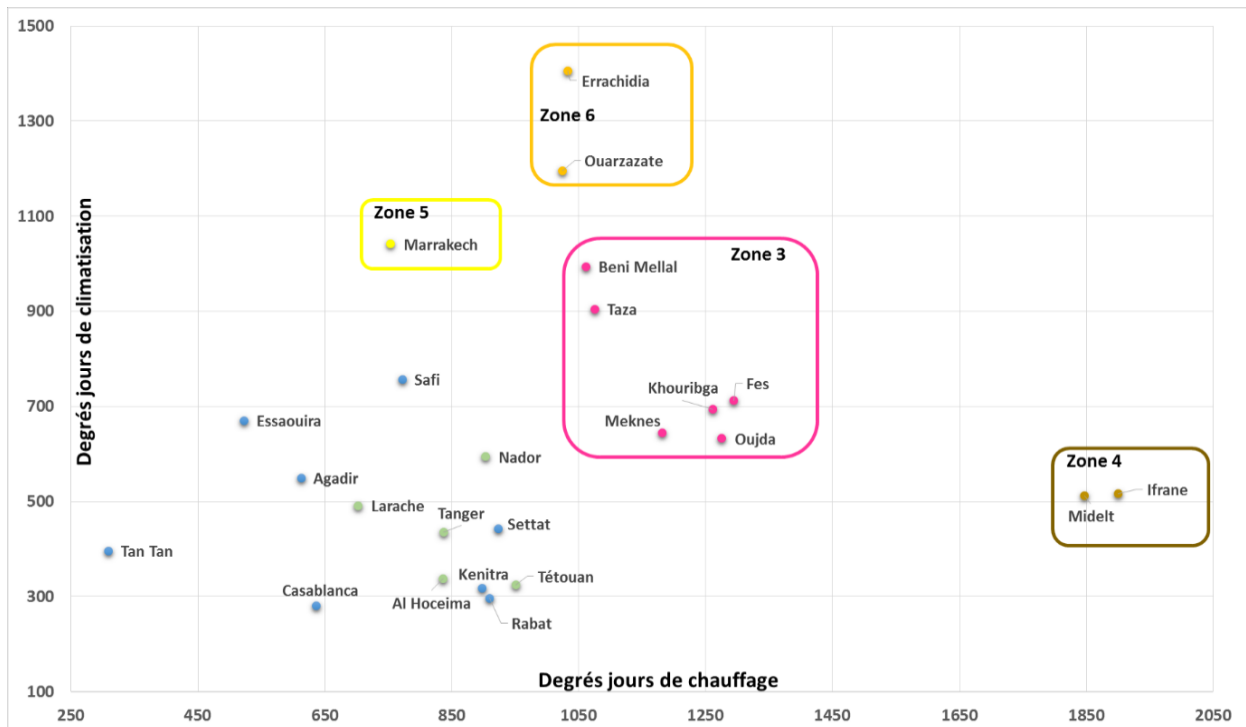


Figure 2-13 - Degrés-jours de chauffage et de climatisation par ville avec la méthode à pas horaire

Les villes non encerclées correspondent aux zones 1 (en bleu) et 2 (en vert). Nous remarquons que les zones climatiques 3, 4, 5 et 6 se distinguent sur le graphique, tandis que les degrés jours



des villes des zones 1 et 2 sont assez similaires. Les résultats de la méthode des degrés-jours viennent alors confirmer le zonage de la réglementation thermique marocaine.

Nous présentons dans les figures ci-dessous l'évolution des degrés-heures de chauffage et de climatisation dans la ville de Settat (les degrés-heures s'obtiennent en multipliant les degrés-jours par un facteur de 24).

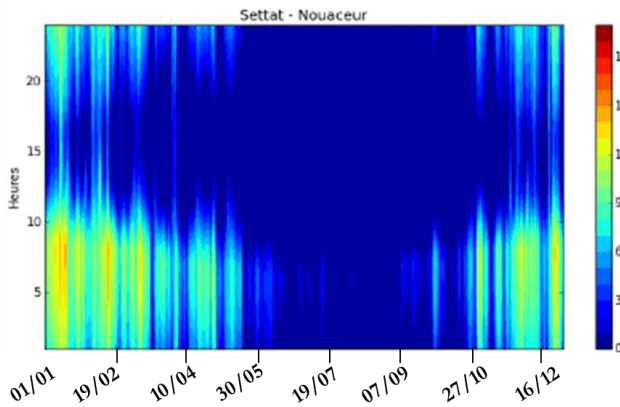


Figure 2-14 - Degrés-heures de chauffage à Settat

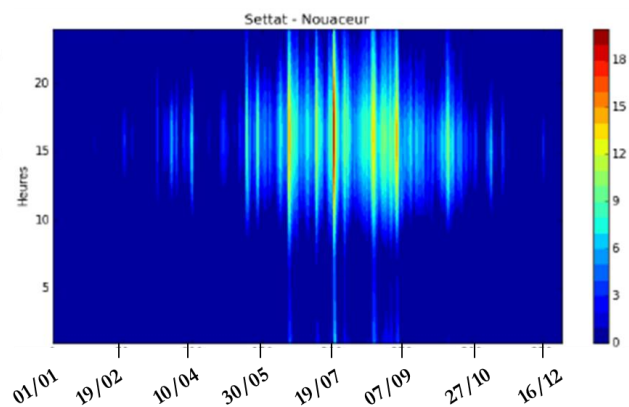


Figure 2-15- Degrés-heures de climatisation à Settat

Il est à noter qu'à Settat et globalement au niveau national, il est nécessaire de chauffer entre novembre et avril et de climatiser entre mai et octobre.

## 4. ELEMENTS DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT

### 4.1. Enveloppe du bâtiment

L'enveloppe du bâtiment est l'ensemble constitué des parois opaques (murs, plancher bas, plancher haut), des ouvertures (fenêtres, portes ...) et des protections solaires en option. L'enveloppe constitue la zone la plus exposée d'un bâtiment. C'est l'ossature qui sépare l'intérieur du bâtiment de l'extérieur. La qualité de l'enveloppe du bâtiment est un facteur déterminant qui peut influencer la quantité d'énergie consommée pour le chauffage, la climatisation et la ventilation.

#### 4.1.1. Parois opaques

Ces éléments correspondent aux parois opaques verticales et horizontales. Ils sont généralement construits avec des murs en bois, en charpente métallique, en béton, en briques ou en maçonnerie. Ces parois sont définies sur *TRNSYS* avec :

##### 4.1.1.1. Un coefficient de transmission thermique U

Les échanges de chaleur à travers l'enveloppe sont proportionnels au coefficient "U". Ce coefficient est défini dans la réglementation thermique marocaine comme « *Il correspond au taux d'écoulement de chaleur en régime permanent divisé par mètre carré de surface et par la différence de température entre les environnements de chaque côté de la paroi. Ce coefficient*

est exprimé en  $W/(m^2.K)$ . ». La réglementation thermique, via son approche prescriptive, impose une valeur limite maximale de “U” pour chaque élément de l’enveloppe. Sur *TRNSYS*, le coefficient est calculé sur la base des différentes couches qui composent le mur. Afin de réduire ce coefficient, la solution la plus évidente est d’ajouter des couches d’isolant à la composition des parois.

#### 4.1.1.2. Un coefficient d’absorption solaire

Ce coefficient traduit la capacité des revêtements et des peintures utilisés pour capter ou non le rayonnement solaire. Il varie entre 0,9 (couleur noir foncé) et 0,1 (couleur blanche). Sur *TRNSYS*, ce coefficient est à définir pour les deux faces de chaque paroi. Un bon choix du coefficient d’absorption solaire, en l’occurrence pour la toiture, peut permettre jusqu’à 13% d’économie d’énergie (36).

Couleur	Coef. d'absorption
Blanc	0,18
Jaune	0,33
Orange	0,41
Rouge sombre	0,57
Vert sombre	0,88
Bleu foncé	0,91
Noir	0,94

Figure 2-16 - Coefficient d’absorption des surfaces peintes (37)

Au Maroc, la couleur rouge est répandue dans plusieurs villes dans l’intérieur du pays ; nous n’avons qu’à citer le cas de la ville de Marrakech, alors que dans les villes côtières, par exemple la ville de Casablanca, nous retrouvons une présence majoritaire des façades blanches.

#### 4.1.2. Fenêtres

Outre leur contribution à la performance énergétique des bâtiments, les fenêtres permettent d’approvisionner ces derniers en lumière naturelle et d’avoir accès à une vue extérieure ; ces deux paramètres ont des bénéfices psychologiques sur les occupants du bâti.

S. Jaber et al. ont étudié l’impact du coefficient U des vitrages (simple, double et triple), de leur orientation et dimensions sur les besoins annuels de chauffage et de climatisation. Les résultats démontrent que les besoins en chauffage sont plus sensibles à la variation des dimensions et du type de vitrage que les besoins de climatisation. Des vitrages optimisés permettent une économie d’énergie jusqu’à 24% à Berlin (38). M. K Urbikain et al. ont étudié l’impact du facteur U du vitrage, du facteur U et du coefficient d’absorption du cadre, des apports solaires et de l’infiltration sur les performances énergétiques d’un bâtiment résidentiel en France, en utilisant trois méthodes de calcul dont la troisième via le logiciel *TRNSYS* (39).

La réglementation thermique marocaine définit le taux global des baies vitrées (TGBV) comme étant le rapport entre la surface totale des baies vitrées et la surface totale brute de l’ensemble des murs extérieurs. Aussi, le facteur solaire des fenêtres est un pourcentage qui exprime la quantité d’énergie solaire retrouvée derrière les baies vitrées exposées au rayonnement solaire. Il est la résultante des phénomènes complexes de transmission, d’absorption et de réflexion qui ont lieu. Le facteur solaire est donné généralement par le fabricant des vitrages (12).

Le facteur solaire peut être diminué en déposant une fine couche transparente de métaux nobles par pulvérisation cathodique sur la face interne de la vitre extérieure (vitrage à contrôle solaire), ou à travers la mise en place des protections solaires fixes ou mobiles.

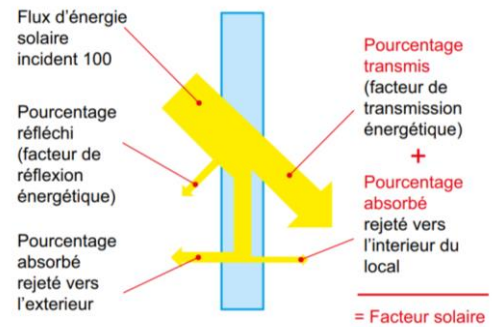


Figure 2-17 - Facteur solaire des vitrages (RTCM)

Pour le résidentiel, la réglementation thermique marocaine, via son approche perspective, exige un coefficient U minimal des vitrages de  $1,90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  pour des TGBV entre 36-45 % dans les zones 3, 4, 5 et 6 ; le coefficient U maximal de  $5,80 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  est préconisé pour des faibles TGBV (inférieur à 15%) dans les zones 1 et 2.

Sur TRNSYS, plusieurs types de vitrages sont prédéfinis dans la bibliothèque d'objets ; vitrages simples, double, triples, doubles à faible émissivité argon etc.

Window Type Manager

window type: DOUBLE

Glazing

ID number: 4001 WinID Pool

slope of window: 90 degree

u - value: 1.76 W/m<sup>2</sup> K

g - value: 0.597 %/100

For 1 glazing module width: m height: m ID spacer: 0 Data from w4-1b.dat

Convective Heat Transfer Coefficient of Window

Front (inside): userdefined 11 kJ/h m<sup>2</sup> K

Back (outside): userdefined 64 kJ/h m<sup>2</sup> K

Optional Properties of Shading Devices

Additional Heat Resistance: internal device: 0 h m<sup>2</sup> K/kJ, external device: 0 h m<sup>2</sup> K/kJ

Reflection Coefficient of Internal Device: towards window: 0.5 % / 100, towards zone: 0.5 % / 100

Fraction of abs. Solar Radiation to Zone Air Node (CCISHADE): 0.5 % / 100

Frame

area frame/window: 0.2 % / 100

u - value (1/R): 8.17 kJ/h m<sup>2</sup> K

solar absorptance: 0.6

OK Cancel Save to user library

Figure 2-18 - Windows Type Manager sur TRNSYS

## 4.2. Ventilation et protections solaires

### 4.2.1. Ventilation :

La ventilation a pour principal but de maintenir la qualité de l'air intérieur et d'éviter les dégradations du bâtiment. Elle permet d'évacuer l'humidité et les polluants générés pour diverses causes à l'intérieur du bâtiment. Elle est faite soit d'une manière naturelle, mécanique ou hybride. La norme française *NF EN 15251* définit un débit d'air minimal pour avoir un air intérieur de qualité.

#### 4.2.1.1. Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est réalisée par écoulement de l'air des zones de haute pression vers celles de pression plus basse (différence de pression). Le renouvellement d'air naturel est régi par les défauts d'étanchéité et/ou par les différentes ouvertures de l'enveloppe.

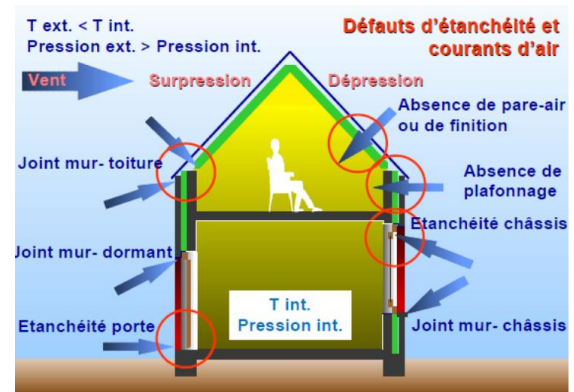


Figure 2-19 - Les défauts d'étanchéité des bâtiments (40)

Plusieurs études ont démontré que le débit d'infiltration d'air a des effets significatifs sur les consommations énergétiques (41). Des valeurs maximales du taux d'infiltration d'air à 50 Pa sont définies par les réglementations thermiques et labels dans monde :

- *Etats Unis pour le résidentiel : Inférieur à 3 pour le climat froid et 5 Vol / h pour le climat chaud ;*
- *Label Passivhaus : Inférieur à 0,6 ;*
- *Union européenne avec ventilation : 0,6 à 1 ;*
- *Union européenne sans ventilation : 2,5 à 3.*

#### 4.2.1.2. Ventilation mécanique

La ventilation mécanique permet l'aspiration d'air extérieur à travers des entrées d'air et le rejet de l'air intérieur, à l'aide de ventilateurs. Nous distinguons deux types fréquemment utilisés :

##### 4.2.1.2.1. La ventilation simple flux :

Elle permet la circulation d'air en provenance d'entrées autoréglables (débit de ventilation fixe) ou hydro-réglables (débit de ventilation variable et s'adapte au taux d'humidité des différentes pièces) vers l'intérieur du bâtiment, pour qu'il ressorte ensuite via les bouches d'extraction situées dans les pièces humides, à l'aide d'un ventilateur. Les principaux avantages de ce procédé sont sa facilité de mise en œuvre et son prix abordable.

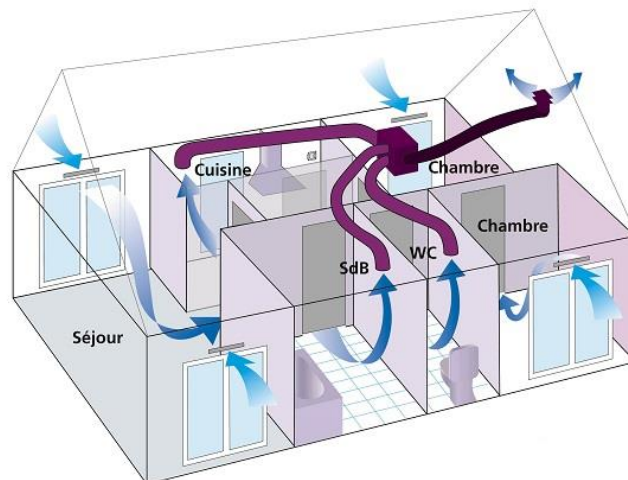


Figure 2-20 - Schéma de principe d'une ventilation simple flux

#### 4.2.1.2.2. Ventilation double flux

La ventilation VMC double flux assure, tout comme la ventilation simple flux, le renouvellement d'air d'un logement, mais grâce à sa technologie limite les pertes de chaleur inhérentes à la ventilation en préchauffant l'air neuf grâce aux calories présentes et récupérées dans l'air extrait. Le préchauffage se fait grâce à un échangeur de température dans lequel se croisent les flux d'air (de préférence à contre-courant) et qui se trouve installé à l'intérieur du caisson de ventilation. Ainsi, elle apporte plus de confort et une meilleure qualité d'air dans le bâtiment et une économie d'énergie à travers la récupération des calories présentes dans l'air vicié extrait. Cependant, ses principaux inconvénients par rapport au système simple flux sont les coûts d'investissement plus importants et la complexité d'installation. Elle peut également être auto réglable ou hydro-réglable.

#### 4.2.2. Protection solaire

Les protections solaires constituent un élément clé de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la gestion de la lumière naturel des bâtiments. Une bonne gestion de ces systèmes permet de maximiser les apports solaires en hiver et de les minimiser en été.

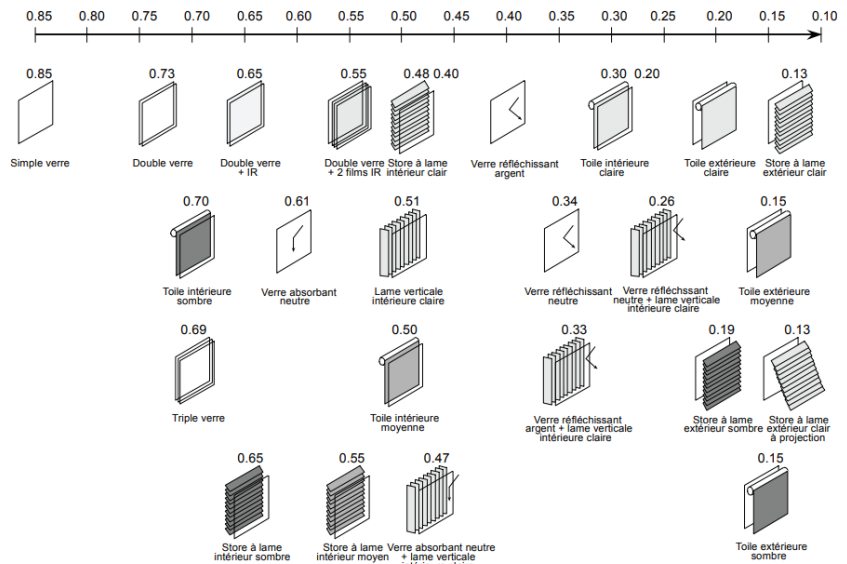


Figure 2-21 - Protections solaires et leurs facteurs solaires

## 5. MATERIAUX DE CONSTRUCTION

### 5.1. Caractéristiques thermiques des matériaux

La conductivité thermique, la capacité thermique et la masse volumique constituent les trois paramètres essentiels pour définir les matériaux dans la bibliothèque de TRNSYS.

#### 5.1.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est une propriété intrinsèque d'un matériau (solide, liquide ou gaz) représentant sa faculté à diffuser de la chaleur sans mouvement macroscopique de la matière. Elle s'exprime en  $W/m.K$  ou  $W/m.°C$ .

Elle indique la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique :

- En 1 seconde ;
- A travers 1 m<sup>2</sup> d'un matériau ;
- A travers une épaisseur d'un 1 m ;
- Lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (1 K = 1 °C)

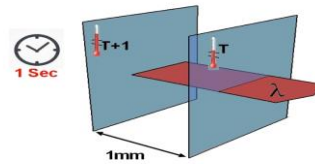


Figure 2-22- Calcul de la conductivité thermique

L'épaisseur des matériaux à utiliser dépend, entre autres, de leur conductivité thermique pour avoir une même valeur de conductivité thermique. La conductivité thermique étant inversement proportionnelle à l'épaisseur mise en place. La figure ci-dessous montre un comparatif des épaisseurs de matériaux à mettre en place pour une conductivité thermique équivalente :

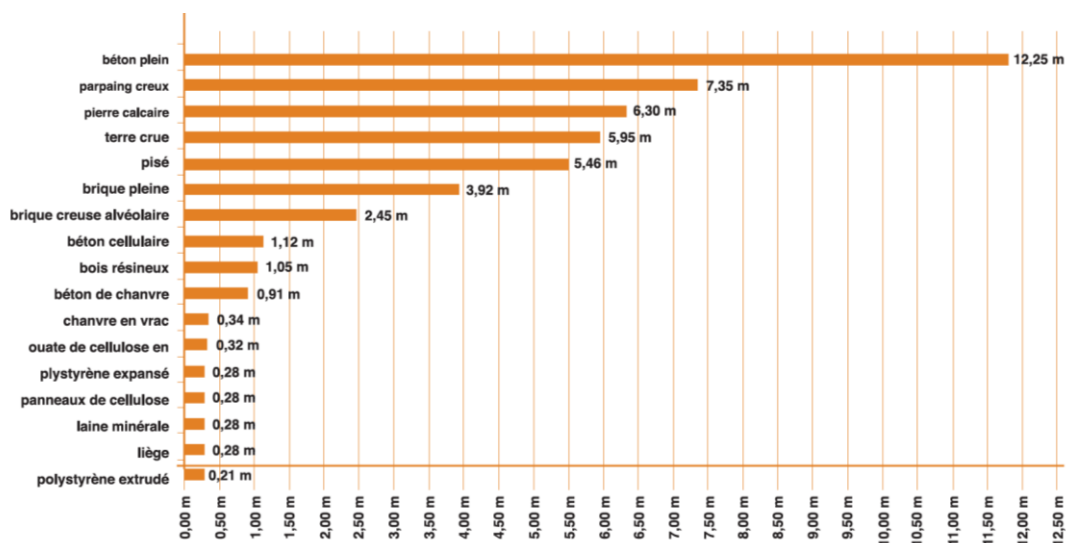


Figure 2-23 - Epaisseur en mètres pour un pouvoir isolant équivalent (Maquette Guide AZEL (42))

Nous remarquons que l'utilisation du béton plein seul ne permet pas d'avoir de bonnes performances thermiques, et qu'il est judicieux de le coupler avec un isolant de performance thermique meilleure.

### 5.1.2. Capacité thermique

La capacité thermique est la quantité de chaleur que peut emmagasiner un matériau par rapport à son volume. Elle est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 mètre cube du matériau. Plus la capacité thermique est élevée, plus la quantité de chaleur que peut stocker le matériau est grande :  $C = \frac{Q}{\Delta T}$

Avec Q la quantité de chaleur à absorber et ΔT l'élévation de la température associée.

### 5.1.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique). La diffusivité thermique est fréquemment désignée par les lettres  $a$ ,  $D$  ou la lettre grecque  $\alpha$  :  $D = \frac{\lambda}{\rho c}$

Où :

- $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau, en  $[W/m.K]$
- $\rho$  est la masse volumique du matériau, en  $[kg/m^3]$
- $c$  est la capacité thermique massique du matériau, en  $[J/kg.K]$

La diffusivité thermique est une grandeur intensive. Elle détermine l'inertie thermique d'un solide.

## 5.2. Matériaux de construction au Maroc

Le secteur des matériaux de construction revêt une importance notable dans l'industrie nationale, avec 37 Milliards de dirhams de chiffre d'affaires et 25700 emplois (43). Ce secteur est bien organisé et bien encadré. Au niveau de l'organisation patronale du Maroc, la Confédération Générale des Entreprises du Maroc (CGEM), le secteur est représenté par de nombreuses associations professionnelles métiers regroupées au sein de la Fédération Nationale du Bâtiment et des Travaux publics (FNBT), de l'Association Marocaine des Promoteurs Immobiliers (AMPI), etc. Les entreprises privées opérant dans le secteur des matériaux de construction sont souvent affiliées à des fédérations et des associations professionnelles, notamment la Fédération des Matériaux de Construction (FMC), l'Association Professionnelle des cimentiers (APC), l'Association Professionnelle des Industries Céramiques (APIC), l'Association Professionnelle des Briquetiers (APB), l'Association Professionnelle des fabricants Industriels du Plâtre (AFIP), l'Association Professionnelle des Producteurs de Béton Prêt à l'Emploi (APPBPE)... Le secteur bénéficie d'un centre important (CETEMCO) à Casablanca dédié aux essais, à la formation, à la recherche, comme des services du Laboratoire Public d'Etudes et d'Essais (LPEE).

Au Maroc, il se produit une grande quantité de matériaux de construction et la production nationale est en mesure de satisfaire les 90% des besoins du pays, selon la Fédération des Industries de Matériaux de Construction (44). La construction est principalement basée sur des matériaux structurants à base de ciment et de béton (B20, B25, B30), béton cellulaire, parpaings (agglomérés de béton), mortier, plâtre, la chaux, la pierre traditionnelle, les grés, les carreaux céramiques et le zellige traditionnel (14).

La figure ci-dessous montre des briques rouges en terre cuite et un parpaing béton creux. Ce dernier est utilisé pour la construction des murs porteurs en façade et à l'intérieur, des murs de clôture, des garages ...



Figure 2-24- Briques rouges et parpaing béton

En matière de produits de construction, ceux qui relèvent du gros œuvre sont majoritairement produits localement, tandis que les isolants thermiques et les équipements techniques (chauffage, climatisation, éclairage, chauffe-eau solaire...) sont largement importés. À terme, l'efficacité énergétique des bâtiments devrait constituer un puissant encouragement au développement d'une offre nationale de produits.

### 5.3. Isolants thermiques

Le choix de l'isolant thermique à mettre en place ne dépend pas uniquement de la conductivité thermique (la plus faible possible), mais également de :

- L'épaisseur et le poids les plus réduits possible ;
- La facilité de pose (matériau souple, s'adaptant à toutes les surfaces) ;
- La longévité (matériau qui résiste à la compression, à la haute température) ;
- L'utilisation d'énergie réduite pour sa fabrication ;
- La non-nocivité envers la santé et l'environnement ;
- La résistance au feu ;
- Le prix abordable...

Un bon isolant doit aussi être rigide et/ou dense (au moins 30 à 40 kg/m<sup>3</sup>) pour ne pas se tasser et avoir ainsi une bonne tenue dans le temps. Les méthodes d'isolation thermique diffèrent également en fonction de plusieurs paramètres :

- Type de la paroi traitée (toiture, mur, sol) ;
- Type d'isolant thermique utilisé ;
- Solution d'intégration de l'isolant à la composition de la paroi (intérieur, milieu, extérieur) ;
- Mode de fixation de l'isolant thermique.

### 5.4. Modèles de construction efficace au Maroc

A titre d'exemple, 9 modèles de construction efficace au Maroc ont été mis en place par l'agence marocaine de l'efficacité énergétique (AMEE) dans le cadre du Programme National



d'Efficacité Énergétique dans les bâtiments. Les neuf projets de démonstration ont été sélectionnés afin de servir de modèle et de base de calcul des surcoûts à prévoir lors de l'introduction des mesures d'efficacité énergétique. Les 5 projets concernant le résidentiel (dont 1 dans la province de Casablanca-Settat) sont :

- **Atlas faible coût :** Le projet consiste en la mise en place de 222 logements faible coût, type bâtiments résidentiels, à Ouarzazate. Les mesures énergétiques, visant de réduire de moitié les besoins de chauffage et de climatisation, mises en place sont :
  - *Volets extérieurs à persiennes ;*
  - *Isolation de la toiture par du polystyrène extrudé ;*
  - *Isolation des murs par l'extérieur par du ciment de chanvre ;*
  - *Double vitrage à faible émissivité ;*
  - *Système de ventilation performant (tirage éolien) ;*
  - *Détecteurs de présence dans les circulations ;*
  - *Systèmes technologiques pour la comptabilité énergétique (contrôle et mesure des consommations) ;*
  - *Chauffe-eaux solaires pour la production d'eau chaude sanitaire.*
- **Jacaranda :** projet de 272 logements type bâtiments résidentiels dans la province de Tensift Al Houz, les mesures énergétiques mises en place visent essentiellement à réduire les besoins de chauffage :
  - *Isolation de la toiture, des murs extérieurs, du plancher bas sur terre-plein et des planchers intermédiaires donnant sur les commerces du RDC ;*
  - *Installation de double vitrage ;*
  - *Installation de « lights shelves » en béton en partie supérieure des cages ;*
  - *Installation de ferme porte automatique des entrées de cage d'escalier 3/6 L.*
- **AL Ououd 2 :** 144 logements sociaux (bâtiments résidentiels) dans la province du Nador, les principales mesures pour faire des économies de chauffage (69%) et de climatisation (39%) sont :
  - *Installation de brise-soleil et de volets roulants sur tous les vitrages (sauf ceux donnant sur les sanitaires et les locaux de stockage) ;*
  - *Isolation des toitures, des murs extérieurs et des planchers bas, mise en place de double vitrage ;*
  - *Installation de chauffe-eau solaires.*
- **Al Karama :** Projet de 96 logements sociaux type bâtiments résidentiels dans la province de Meknès, les principales mesures pour faire des économies de chauffage (92%) et de climatisation (33%) sont :
  - *Mise en place de stores extérieurs, de vitrages performants ;*
  - *Isolation des toitures, des murs et des planchers bas ;*
  - *Installation de détecteurs de présence dans les circulations ;*
  - *Installation de chauffe-eau solaires.*
- **Fal El Hanaa :** projet de 637 logements type bâtiment résidentiel à Ain Sebaa, Casablanca. Les principales mesures pour faire des économies de chauffage (70%) et de climatisation (56%) sont :

- Isolation de la toiture (laine de roche) ;
- Isolation des murs par l'intérieur et par l'extérieur (brique double + perlite) ;
- Installation de double vitrage (4/6/4, 1,4 W/m<sup>2</sup>.K) ;
- Occultation des menuiseries sur les chambres (volets roulants) ;
- Mise en œuvre d'une ventilation simple flux.

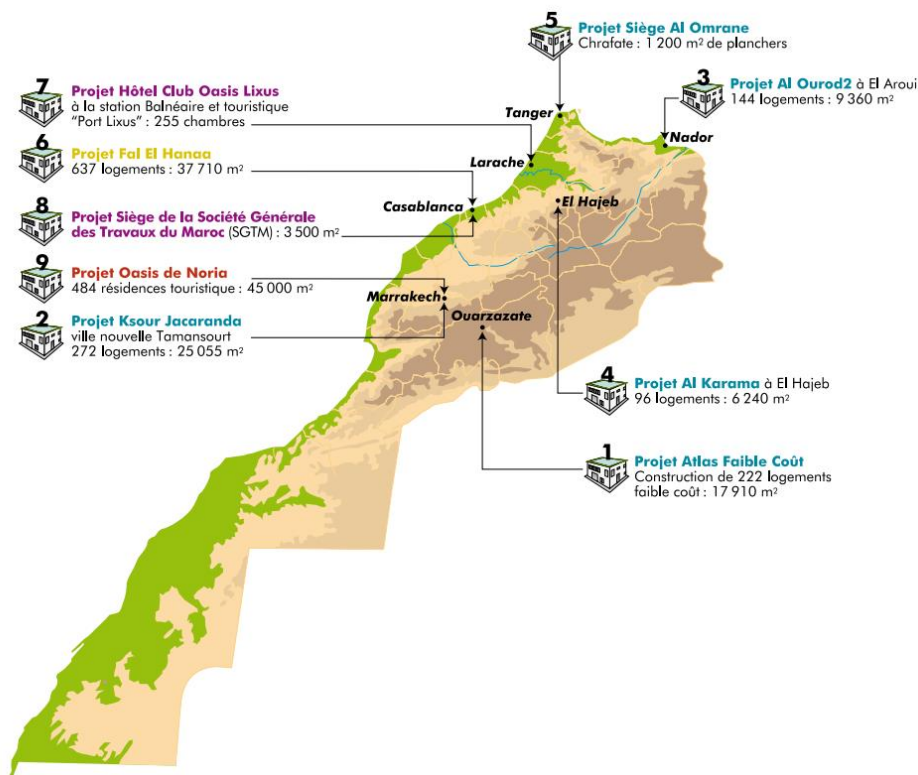


Figure 2-25- Les 9 projets répartis sur les différentes zones climatiques (45)

Nous remarquons que les mesures sont axées sur l'isolation thermique et sur le type de vitrage et les occultations.

## 5.5. Modes de construction au Maroc

Généralement, la structure des bâtiments au Maroc, notamment dans le tertiaire et les logements collectifs, est constituée :

- D'une ossature poteaux et poutres ou portique en béton armé ;
- D'une enveloppe extérieure, selon le type du bâtiment, en murs simples en briques rouges creux, ou murs doubles avec lame d'air, ou de murs simples en parpaings.

Les toitures se composent d'un système de planchers à hourdis en béton granulé ou de dalles pleines en béton armé. Les murs extérieurs à double cloison, sont généralement composés, depuis l'extérieur vers l'intérieur, de :

- Un enduit extérieur en mortier bâtard : ciment et sable ;
- Des briques extérieures céramiques à 8 trous (10,5cm d'épaisseur) ;
- De l'air ;

- Des briques intérieures à 6 trous (7 ou 6,5cm d'épaisseur) ;
- Un enduit intérieur.

On peut aussi voir un mur extérieur simple en agglomérés de granulats (aggllo).

M. Moubarak (46) a réalisé dans le cadre de sa thèse de doctorat une étude terrain pour constater les caractéristiques des parois les plus utilisés au Maroc, en l'occurrence dans la région de Tanger. Il en ressort qu'il n'y a pas de normes ou règles spécifiques pour le choix de l'épaisseur de la lame d'air des murs à double cloison de façade. Les réponses des responsables de différents chantiers étaient souvent « *pour cacher les rideaux ou les stores de protection* ».



Figure 2-26 - Exemple projet en construction



Figure 2-27 - Lame d'air 10cm

La réglementation thermique marocaine a été réalisée sur la base des propriétés des parois extérieures ci-dessous :

Tableau 2-2- Caractéristiques des parois extérieures

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

Nous retenons cette dernière composition pour la première configuration des parois de notre bâtiment modèle, présenté dans le chapitre 4 de ce mémoire.

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les logiciels phares qui sont déployés dans notre travail de thèse, à savoir *TRNSYS* et *Meteonorm*. Nous avons utilisé ce dernier pour analyser les données météorologiques de plusieurs villes du Royaume. Les résultats par la méthode des degrés-jours réalisés sur la base des fichiers météo de *Meteonorm* sont en concordance avec le zonage climatique du *RTCM*. Nous avons également présenté les paramètres d'enveloppe des bâtiments, des matériaux de construction et des modèles de bâtiments à haute efficacité énergétique au Royaume. Ces données seront utilisées dans la proposition de notre bâtiment modèle étudié dans le chapitre 4.

Le chapitre suivant présentera l'outil *SAMOT* développé dans le cadre de notre travail pour étudier, comprendre et optimiser les performances des bâtiments sur *TRNSYS*.

# Chapitre 3 - Développement de l'outil SAMOT (Sensitivity Analysis And Multiobjective Optimization Tool)

---

## 1. ETAT DE L'ART DES METHODOLOGIES D'ANALYSE DE SENSIBILITE, D'OPTIMISATION MULTICRITERE ET DE REGRESSION POLYNOMIALE

Dans un premier lieu, nous détaillons l'état de l'art des méthodologies qui seront implémentées dans l'outil SAMOT, en vue de proposer un outil performant et facilement couplable à TRNSYS, permettant de réaliser notamment des :



### 1.1. Analyse de sensibilité

#### 1.1.1. Description des méthodes d'analyses de sensibilité

Les méthodes d'analyses de sensibilité sont incontournables lors de l'utilisation et la mise en place des modèles de simulation. Elles permettent en effet de déterminer les paramètres d'entrée du modèle qui contribuent le plus à la variabilité de la sortie, de déduire les paramètres qui n'ont pas ou que peu d'influence sur la sortie et de mesurer l'interaction des paramètres au sein du modèle.

L'intérêt de ces outils pour un ingénieur, modélisateur ou chercheur est de lui fournir des résultats, lui permettant de simplifier ses modèles, de les comprendre dans leur globalité et aussi de vérifier leur consistance. Ces conclusions sont indispensables également pour valider la méthode de calcul (logiciel de modélisation, code informatique ...), pour orienter les travaux de recherche et développement et pour argumenter des choix de conception. L'analyse de sensibilité est une discipline à part entière de la statistique.

Les analyses de sensibilité d'un modèle construit ont longtemps été axées sur l'interprétation des impacts des petites variations des valeurs de l'entrée (autour d'une valeur nominale) sur la sortie du modèle (47). Cette approche est basée sur le calcul des indices à partir des dérivées partielles d'un modèle en un point donné (variation de la sortie / faibles perturbations de l'entrée). Ces méthodes ont été utilisées dans divers domaines (Climatologie, océanographie ...) (48) (49).

A partir des années 1990, une nouvelle génération d'approche pour l'analyse de sensibilité a été développée pour pallier les insuffisances des méthodes d'analyse locale qui ne permettent pas d'appréhender le système dans sa globalité. Ces nouvelles méthodes sont les méthodes d'analyses de sensibilité globales. Comme leur appellation l'indique, elles s'intéressent à la

variabilité des paramètres dans l'intégralité de leurs domaines de variation, permettant d'avoir des résultats plus significatifs pour les modélisateurs et les utilisateurs des simulations numériques, leur permettant de mieux construire leurs modèles. En somme, les analyses de sensibilité permettent de déterminer :

- Les paramètres ayant une forte influence sur la sortie du modèle. Cette information permet de savoir si la modélisation reflète correctement le modèle physique. Si l'analyse détermine qu'un paramètre connu comme non influent a une importance forte, la modélisation ne représentera pas fidèlement le modèle et il faudra alors la modifier.
- Les paramètres ayant une grande variabilité sur la sortie du modèle. Une meilleure connaissance de ces paramètres permettra de réduire les erreurs sur les sorties du modèle.
- Les paramètres ayant peu voire pas d'influence sur la sortie du modèle. Une valeur par défaut pour ces paramètres pourra être choisie.
- Les corrélations entre les paramètres. La connaissance des interactions permet de mieux comprendre le phénomène modélisé et permet de s'intéresser à des groupes de paramètres plutôt qu'à un paramètre isolé.

Différentes méthodes d'analyses de sensibilité existent, A. Saltelli (50) en dresse un large aperçu. Nous pouvons citer :

- La méthode du *Screening* qui permet avec un faible nombre de simulation de déterminer les paramètres les plus influents qui émettent une information qualitative.
- Les méthodes de sensibilité *locales* et *globales* qui permettent de déterminer les effets des paramètres sur la sortie du modèle.
- L'analyse d'incertitude qui permet de déterminer un intervalle de confiance pour la sortie du modèle.
- La calibration qui permet d'effectuer une comparaison avec l'expérimentation et ainsi de déterminer les valeurs optimales des paramètres.

Le principe général de réalisation des analyses de sensibilité est expliqué dans la figure suivante.

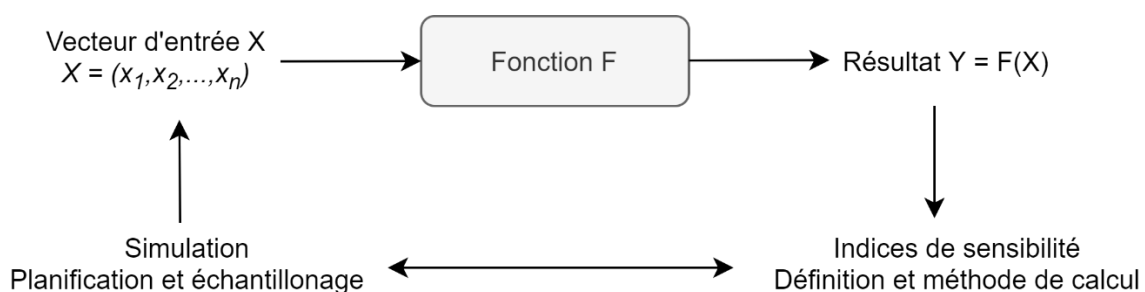


Figure 3-1 - Principes d'analyse de sensibilité

## 1.1.2. Méthodes d'analyse de sensibilité

### 1.1.2.1. Méthode de Screening

Les modèles mathématiques sont souvent complexes et impliquent un grand nombre de paramètres d'entrée. La question qui se pose est : *quels paramètres sont réellement influents sur les sorties du modèle qui nous intéressent ?*

Pour identifier les paramètres les plus importants parmi un grand nombre de paramètres, le choix de l'expérience est essentiel. Elle doit permettre avec un nombre de simulation limité d'obtenir un résultat. La méthode de Screening permet d'obtenir cette information. Elle est peu coûteuse en temps de calcul et elle est utilisée dans différents domaines. L'inconvénient de cette méthode c'est qu'elle permet uniquement d'obtenir une information qualitative sur les paramètres les plus influents. Les paramètres sont classés par ordre d'importance mais cette méthode ne permet pas de quantifier l'importance d'un paramètre par rapport à un autre. M.D. Morris (51) a proposé une méthode qui fait varier un paramètre à la fois. Elle permet de classer les entrées en trois groupes selon leurs effets :

- Effets négligeables ;
- Effets linéaires et sans interaction ;
- Effets non linéaires et/ou avec interactions

### 1.1.2.2. Analyses de sensibilité locale

Les analyses de sensibilité locale estiment la dérivée de la sortie  $y$  par rapport au paramètre  $i$  au voisinage de la valeur nominale des paramètres :

$$\frac{\partial Y}{\partial x_i} / X = X_0$$

L'analyse de sensibilité locale permet, avec un grand jeu de paramètres et un faible nombre de simulations, d'obtenir une information qualitative sur les paramètres influençant le plus la sortie du modèle. Elles sont simples à mettre en place et sont idéales lorsque le nombre de facteurs d'entrée est trop important pour appliquer directement une analyse de sensibilité globale. Dans cette méthode un seul paramètre varie à la fois, les autres restants à leur valeur nominale, ce qui évite les problèmes d'effets d'annulation (lorsque les effets de deux facteurs ayant des influences sur la sortie s'annulent entre eux). Cette grandeur permet de connaître l'effet du paramètre  $i$ , sachant que sa variation autour de sa valeur nominale est faible, ce qui permet de garantir le critère de linéarité.

Cette méthode demande un nombre de simulation  $N$  égal au nombre de paramètres ( $k$ ) plus un,  $N = k + 1$ . En considérant un modèle avec  $k$  facteurs d'entrées indépendantes et pour une valeur de  $X$  donnée, l'indice de sensibilité réduit du  $i^{\text{ème}}$  facteur d'entrée est défini comme :

$$S_i(t) = X_i \frac{\partial y_k(t)}{\partial X_i}$$

La méthode est simple à mettre en place car elle ne demande pas de procédure mathématique complexe. Cependant elle ne tient pas compte des effets dus aux interactions entre les paramètres et peut demander un temps de simulation élevé si le nombre de paramètre est grand et le temps de simulation long.

### 1.1.2.3. Analyses de sensibilité globale

Les analyses de sensibilité globale s'intéressent à l'influence des paramètres sur toute leur plage de variation. Elles prennent en compte la distribution associée au paramètre et permet la variation de tous les paramètres à la fois. Elles sont coûteuses en temps de calcul. Les plus répandues sont les méthodes de Sobol, FAST, Random Balance Design et l'analyse de Monte-Carlo. Nous détaillerons dans ce paragraphe la méthode de Sobol.

Dans le cas de la méthode Sobol (50), la sensibilité de la sortie par rapport aux paramètres est donnée par des indices de sensibilité qui sont de différents ordres. L'indice de sensibilité de 1<sup>er</sup> ordre quantifie la part de la variance de  $y$  due à la variable  $x_i$ . Il est donné par :

$$S_i = \frac{V(E(y|x_i))}{V(y)}$$

Il permet d'étudier l'effet d'un paramètre seul, sur son intervalle de variation, sur la sortie.

Sobol (52) a décomposé la fonction  $F$  à étudier en une somme de fonctions de dimensions croissantes, ou représentation ANOVA (Analysis Of VAriance) :

$$Y = F(x_1, \dots, x_n) = F_0 + \sum_i F_i(x_i) + \sum_{i < j} F_{ij}(x_i, x_j) + \dots + F_{12\dots n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Puis il s'est basé sur la décomposition de la variance pour définir les indices de sensibilité d'ordre supérieur à 1 :

$$V = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{1\dots n}$$

L'indice du second ordre est donné par :  $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$  . Il permet d'étudier l'effet des interactions de 2 paramètres sur la sortie.

L'indice total est défini par :  $S_t = \sum_i S_i$  . Il permet d'étudier l'effet du paramètre seul et les effets de son interaction avec tous les autres paramètres sur la variation de la sortie.

Les indices de Sobol sont appréciés car ils sont synthétiques et faciles à interpréter :

- Si l'indice du 1<sup>er</sup> ordre est grand  $\Rightarrow$  le paramètre est influent sur  $Y$ . La réciproque n'est pas vraie.
- Si l'indice d'ordre total est faible  $\Rightarrow$  le paramètre n'a qu'une faible influence sur  $Y$ .



- Si l'indice du premier ordre est faible mais que l'indice total est fort, ce sont des effets d'interaction entre les variables qui donne son l'influence au paramètre .
- Le signe de l'indice du 1<sup>er</sup> ordre nous renseigne sur le sens de la variabilité de la sortie vis-à-vis du paramètre mis en question. Si ce signe est positif, alors la sortie augmente en augmentant la valeur de ce paramètre, et si cet indice est négatif c'est l'inverse.

## 1.2. Optimisation multicritère

### 1.2.1. Généralités

Les méthodes d'optimisation multicritère sont des moyens d'aide à la décision. Elles permettent de faire le meilleur choix possible parmi les différentes solutions existantes selon des critères prédéfinis. Elles sont des outils de soutien pour les concepteurs et les décideurs.

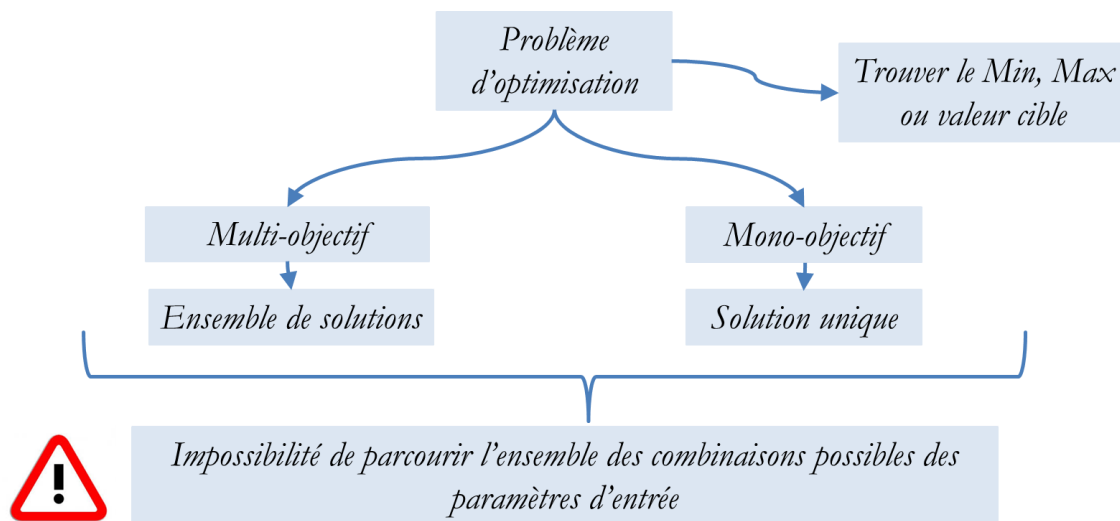


Figure 3-2 - Problèmes d'optimisation et problématique

L'aide à la décision peut passer par trouver des solutions compromises à des problèmes de natures contradictoires (consommation d'énergie et coûts d'investissement par exemple), ou tout simplement par la résolution d'un problème avec un unique critère. 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. Dans un problème mono-objectif, il existe une seule fonction objectif bien définie pour laquelle on fait évoluer le système dans une certaine direction afin d'aboutir à une unique solution optimale. Cependant, dans certains cas, le recours à une seule fonction objectif ne permet pas d'appréhender l'ensemble des points de vue ou aptitude d'un système, ce qui peut conduire à étendre le problème d'optimisation au cadre multi-objectif.

## 1.2.2. Optimisation multicritère dans l'énergétique du bâtiment

Optimiser la conception énergétique d'un bâtiment passe par retrouver les valeurs de plusieurs variables de conception, relatifs aux caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment et aux systèmes utilisés, qui minimisent ou maximisent une ou plusieurs fonctions objectif.

Les paramètres d'entrée dans la simulation thermique dynamique sont constitués des paramètres de l'enveloppe, des systèmes, des données météorologiques etc. Les critères sont à définir par les concepteurs. Ces derniers peuvent être de nature énergétique, économique, social, environnementale etc. Dans ce cas, la recherche de la solution optimale pour un problème d'optimisation multi-objectif soulève quelques réflexions par rapport à la notion même de l'optimalité. En effet, il est impossible de trouver une solution optimale unique pour un problème multi-objectif, car il n'y a aucune combinaison des variables de décision qui minimise (ou maximise) tous les critères à la fois.

Les problèmes multi-objectifs ont, en général, un ensemble de solutions optimales dont les valeurs des fonctions sont en fait les meilleurs compromis possibles dans l'espace des fonctions objectif. Il faut donc utiliser une autre définition de la « meilleure solution », afin de déterminer exactement quelle solution peut être considérée meilleure par rapport à une autre.

Généralement, les combinaisons réalisées sur la base des variables d'entrée des modèles sont d'un grand nombre (voire infini). Ainsi, une procédure d'optimisation solide est nécessaire afin d'explorer le vaste domaine de variation des variables étudiés. Pour chaque scénario, les valeurs des fonctions objectif doivent être évaluées pour atteindre les résultats souhaités. Pour ce faire, les logiciels de simulation thermique sont utilisés, à savoir *TRNSYS* dans notre cas. Cet outil permet de réaliser des simulations sur des années type et fournit des résultats fiables si les bâtiments et systèmes y sont bien modélisés. Le temps requis pour réaliser ces simulations n'est pas négligeable, sachant la réalisation de chaque simulation nécessite environ *une minute*, selon la complexité du modèle étudié. Ainsi, il est utopique de pouvoir parcourir exhaustivement l'ensemble des combinaisons possibles des variables d'entrée. Pour cette raison, l'utilisation des algorithmes d'optimisation est incontournable. Plusieurs méthodes existent ; les métaheuristiques stochastiques (algorithmes génétiques, recuit simulé, méthode Tabou), les méthodes exactes, les méthodes déterministes etc.

## 1.2.3. Méthodologies d'optimisation

### 1.2.3.1. Méthodologies d'optimisation

Nous résumons les techniques de méthodologies d'optimisation multicritère dans le graphique ci-dessous.

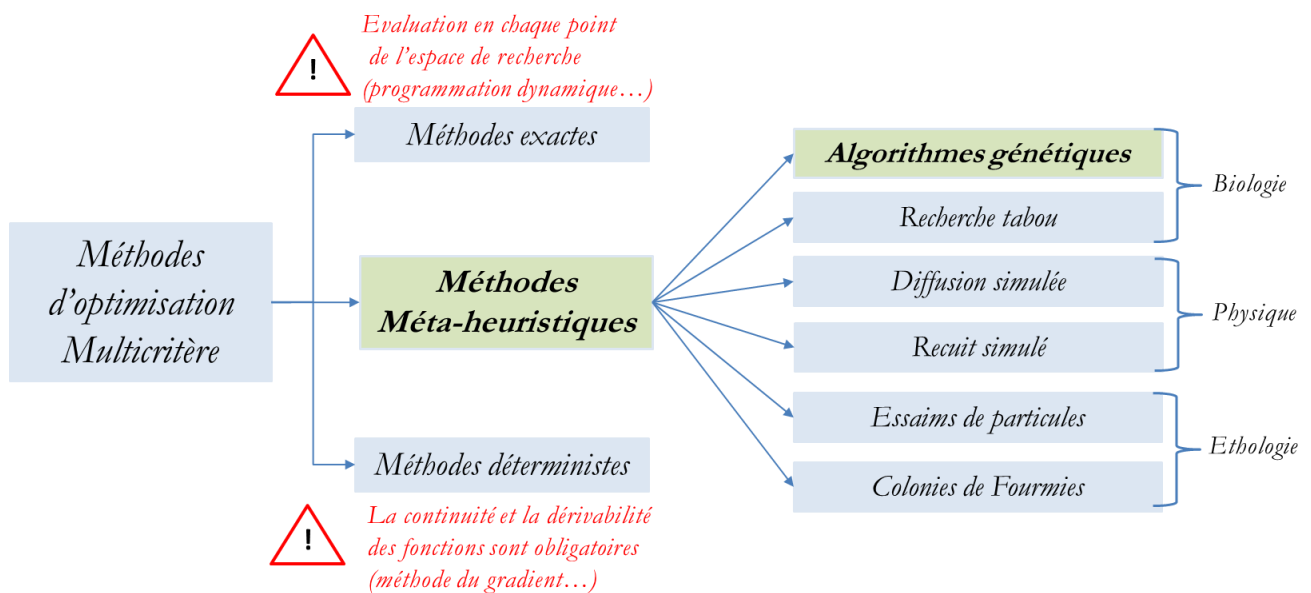


Figure 3-3 - Méthodologies d'optimisation multicritère

Nous retenons l'utilisation des méthodes méta-heuristiques. Le mot méta-heuristique est dérivé de la composition de deux mots grecs :

- Heuristique qui vient du verbe heuriskein et qui signifie 'trouver'.
- Méta qui est un suffixe signifiant 'au -delà', 'dans un niveau supérieur'

Ces méthodes sont souvent utilisées dans l'état de l'art de l'optimisation multicritère dans l'énergétique du Bâtiment pour les raisons suivantes :

- Généralement, les fonctions à étudier sont des sorties des logiciels de simulation, et sont ainsi des fonctions « Boîtes noires ». Dans ces cas, seules les méthodes qui ne reposent pas sur le calcul de la dérivée peuvent être utilisées ;
- Ces méthodes permettent de retrouver des résultats satisfaisant en un temps de calcul raisonnable.

Deux familles de méthodes métaheuristiques existent ; Les métaheuristiques de *voisinage* (qui ne font évoluer qu'une fonction à la fois) et les métaheuristiques *distribuées* qui permettent une manipulation simultanée des solutions dans chaque itération. Elles sont stochastiques, c'est-à-dire que les solutions de départ sont choisies de manière aléatoire. 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.).

#### 1.2.3.1.1. Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (*GA*) sont largement utilisés dans l'état de l'art des méthodes d'optimisation. En effet, une revue des méthodes les plus utilisées a été réalisée par A. T.

Nguyen et al (53), sur la base de 200 articles indexés *Scopus*. Les résultats sont décrits dans la figure ci-dessous :

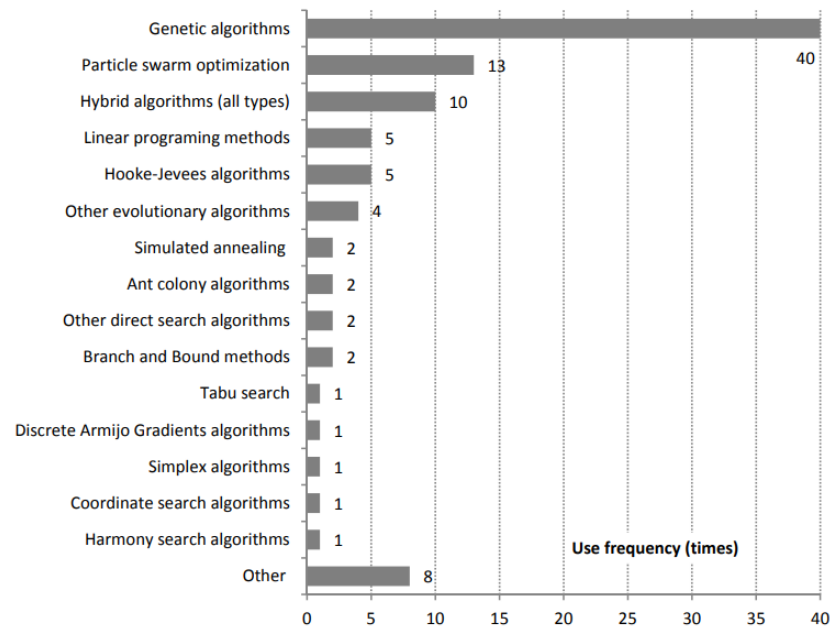


Figure 3-4- Revue des méthodes d'optimisation les plus utilisées

Les GA sont utilisés dans les domaines d'optimisation, d'apprentissage (robotique), de programmation automatique et de l'étude du vivant, du monde réel (marchés économiques, comportements sociaux etc.). Ils ont été initiés dans les années 1970 par John Holland. En effet, il a introduit en 1975 le premier modèle formel des algorithmes génétiques, « *the canonical genetic algorithm AGC* » dans son livre *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Son modèle a été repris par Goldberg qui publie en 1989 un ouvrage de vulgarisation des algorithmes génétiques. Ils s'appuient sur les mécanismes d'évolution dérivés de la génétique : *croisement*, *mutation* et *sélection*. Il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus divers (généralement tirée aléatoirement au départ), à laquelle on applique différents opérateurs (recombinaisons, mutations...) et que l'on soumet à une sélection, à chaque génération. Si la sélection s'opère à partir de la fonction d'adaptation, alors la population tend à s'améliorer (54). Un tel algorithme ne nécessite aucune connaissance du problème : on peut représenter celui-ci par une boîte noire comportant des entrées (les variables) et des sorties (les fonctions objectif). L'algorithme ne fait que manipuler les entrées, lire les sorties, manipuler à nouveau les entrées de façon à améliorer les sorties, etc. (55) C'est ainsi qu'ont procédé les éleveurs pendant des millénaires : ils ont réussi à modifier, selon leurs désirs, de nombreuses espèces animales sans connaissance en génétique ou biologie moléculaire. Les algorithmes évolutionnaires constituent une approche originale : il ne s'agit pas de trouver une solution analytique exacte, ou une bonne approximation numérique, mais de trouver des solutions satisfaisant au mieux à différents critères, souvent contradictoires. S'ils ne permettent pas de trouver à coup sûr la solution optimale de l'espace de recherche, du moins peut-on constater que les solutions fournies sont généralement meilleures que celles obtenues par des méthodes plus classiques, pour un

même temps de calcul. Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

- Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.
- Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
- Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée *fitness* ou fonction d'évaluation de l'individu.
- Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
- Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Une population est composée d'individus ; chaque individu est représenté sous forme de *chromosome*, lui-même est composé d'un ensemble de *gènes*. Par exemple, si l'espace de recherche est composé de 5 types d'isolants et de 6 orientations du bâtiment, une variable prenant les valeurs de 0 à 4 représentera le type d'isolant et une autre variable dont les valeurs sont comprises entre 0 et 5 correspondra aux orientations du bâtiment. A partir de cet encodage, une liste de deux nombres représentera notre individu. La liste [1 2] correspondra au bâtiment avec le type d'isolant 2 et l'orientation 3. Chaque élément de la liste est appelé *gène*.

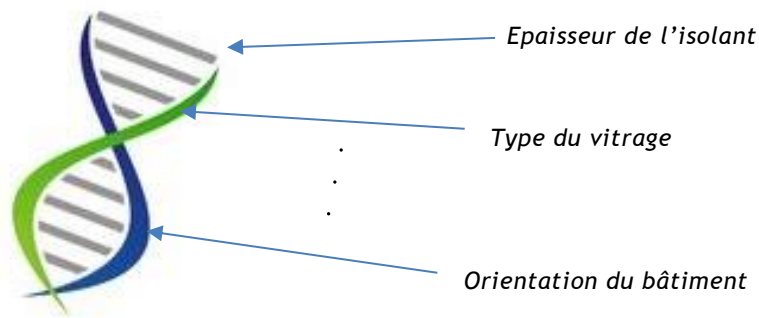


Figure 3-5- Représentation d'un individu

Nous allons décrire ci-dessous les différents opérateurs utilisés dans les algorithmes génétiques.

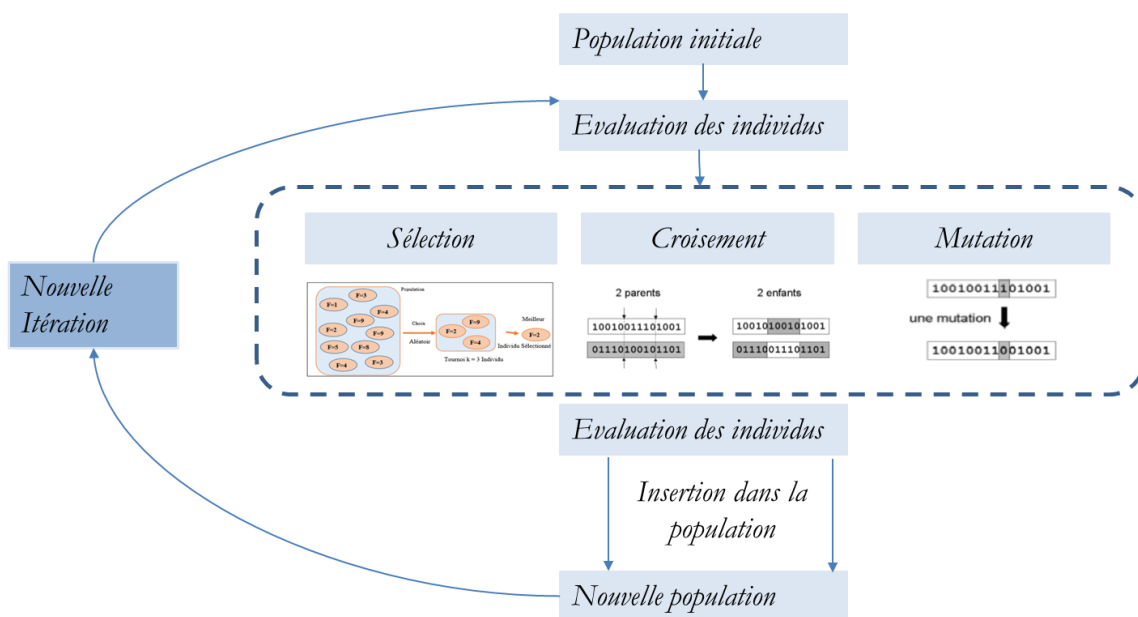


Figure 3-6- Méthodologie d'un GA

### **Opérateur de sélection :**

Cet opérateur est chargé de définir quels seront les individus de la population P qui vont être dupliqués dans la nouvelle population P' et vont servir de parents. Il est important parce qu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. La probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à son efficacité relative au sein de la population.

Plusieurs méthodes de sélection peuvent être utilisés :

- La méthode de la « loterie biaisée » : La sélection des individus par le système de la roulette s'inspire des roues de loterie. Avec cette méthode, chaque individu a une chance d'être sélectionné proportionnelle à sa performance.

- La méthode élitiste : Cette méthode consiste à sélectionner les  $n$  individus dont on a besoin pour la nouvelle génération  $P'$ , en prenant les  $n$  meilleurs individus de la population  $P$ , après l'avoir triée de manière décroissante selon la fitness de ses individus.
- La sélection par tournois : Cette méthode est celle avec laquelle on obtient les résultats les plus satisfaisants. Le principe de cette méthode est le suivant : on effectue un tirage avec remise de deux individus de  $P$ , et on les fait « combattre ». Celui qui a la fitness la plus élevée l'emporte avec une probabilité  $p$  comprise entre 0,5 et 1. On répète ce processus  $n$  fois de manière à obtenir les  $n$  individus de  $P'$  qui serviront de parents.

### **Opérateur de croisement :**

Le croisement est une étape de recombinaison essentielle de l'algorithme évolutionnaire car il permet l'exploration de l'espace de recherche. Une fois la population intermédiaire déterminée, les individus sont aléatoirement répartis en couples. Les chromosomes sont alors copiés et recombinaison de façon à former, en général, deux descendants possédant des caractéristiques issues des deux parents. On forme ainsi la génération suivante. Cet opérateur est appliqué après avoir mis en place l'opérateur de sélection sur la population  $P$  ; on se retrouve donc avec une population  $P'$  de  $n/2$  individus et on doit doubler ce nombre pour que notre nouvelle génération soit complète.

L'opérateur fonctionne avec une probabilité  $P_c$  fixée selon le problème étudié. Plus cette probabilité est élevée, plus il y a de nouvelles structures qui apparaissent dans la population. Si  $P_c$  est trop élevée, les bonnes solutions risquent d'être modifiées très rapidement par rapport à l'amélioration apportée par la sélection. Si  $P_c$  est très faible, la recherche risque de stagner, vu le faible taux d'exploration.

Plusieurs méthodes de croisement existent :

- *Croisement à un point* : un point de croisement est choisit au hasard pour chaque couple de chromosomes :

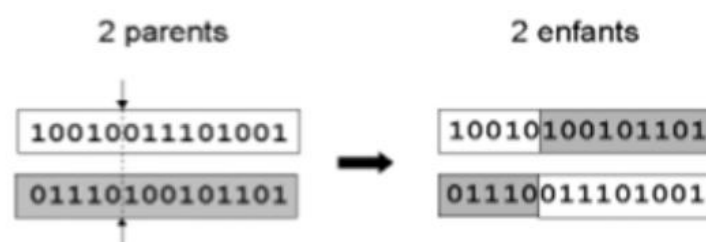


Figure 3-7- Exemple d'un croisement à un point

- *Croisement multi-point* : dans ce cas, plusieurs points de croisement sont sélectionnés et il y a un échange des différentes parties d'allèles cernées par ces points, entre les parents.



Figure 3-8- exemple d'un croisement multipoint

- *Croisement uniforme* : il opère à l'aide d'un masque qui représente les tirages aléatoires, pour décider de la transmission de la valeur de l'allèle à l'un ou l'autre des descendants.

### **Opérateur de mutation :**

La mutation consiste en la modification, de façon aléatoire, de la valeur d'un gène d'un chromosome.

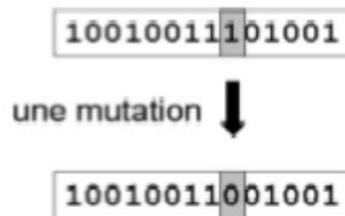


Figure 3-9- Opérateur de mutation

Elle joue le rôle de bruit, empêche l'évolution de se figer et garantit que l'optimum global peut être atteint. Cet opérateur évite donc une convergence prématurée vers les optimums locaux. Il est appliqué avec une probabilité fixée,  $p_m$ . Le taux de mutation rend la recherche trop aléatoire s'il est trop élevé. Par ailleurs, s'il est trop faible, la recherche risque de stagner. Le croisement peut également être réalisé en transposant deux allèles consécutifs ou non d'un chromosomes, en inversant l'ordre des allèles présents entre deux coupes ...

### **Critères d'arrêt d'un GA :**

Le critère d'arrêt indique que la solution est suffisamment approchée de l'optimum. Plusieurs critères d'arrêt des GA sont possibles. On peut arrêter l'algorithme après un nombre de générations suffisant pour que l'espace de recherche soit convenablement exploré, ce critère peut s'avérer coûteux en temps de calcul si le nombre d'individus à traiter dans chaque population est important. L'algorithme peut aussi être arrêté lorsque l'évolution de la population est ralentie. On peut aussi envisager d'arrêter l'algorithme lorsque la fonction d'adaptation d'un individu dépasse un seuil fixé au départ. Nous pouvons également faire des combinaisons des critères d'arrêt précédents.



### 1.2.4. Front de Pareto

Le front de Pareto est largement utilisé dans les travaux d'optimisation à plusieurs objectifs, il permet, via la notion de dominance, de choisir les résultats qui répondent à la problématique d'optimisation multicritère.

Dans un problème de minimisation, soit  $C$  l'ensemble des solutions d'un problème d'optimisation multicritère donné  $(f_1(x), \dots, f_k(x))$ . Le vecteur  $\bar{x} \in C$  domine  $x \in C$  si et seulement si :

- On a  $f_i(\bar{x}) \leq f_i(x)$  pour chacun des critères  $f_i$
- Il existe un  $i_0$  tel que  $f_{i_0}(\bar{x}) < f_{i_0}(x)$  pour un certain  $i_0 \in \{1, \dots, k\}$

Un vecteur  $\bar{x} \in C$  est dit Pareto optimal si et seulement s'il n'est dominé par aucun autre vecteur  $x \in C$  (56).

L'ensemble  $\{(f_1(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})) \mid \bar{x} \text{ Pareto optimal}\}$  est appelé *front* ou *surface de Pareto* pour le problème d'optimisation multicritère donné.

Dans le cas de la figure 3-10 (minimisation de deux objectifs), chaque point rouge représente une solution qui n'est dominée par aucune autre solution. Les points noirs représentent les solutions qui sont dominées sur les deux objectifs par au moins une autre solution. Le choix de la solution optimale se fait donc a posteriori parmi l'ensemble des solutions du front de Pareto suivant l'importance relative des objectifs.

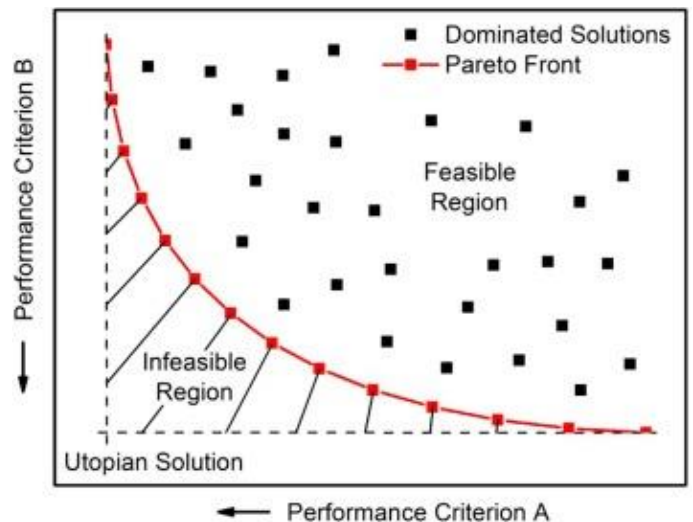


Figure 3-10 - Exemple d'un front de Pareto pour 2 objectifs

Nous allons préconiser l'utilisation de cette méthode pour l'exploitation des résultats dans les travaux d'optimisation décrits dans ce manuscrit.

## 1.3. Plans d'expérience et métamodélisation

### 1.3.1. Introduction

La méthode des plans d'expériences, connue en anglais sous *design of experiments* ou *DOE*, permet de réduire le nombre d'essais à réaliser quand il s'avère compliqué de parcourir l'ensemble des variantes possibles, soit pour des considérations matérielles, de temps ou autre (personnel, matières ...). Elle est utilisée dans tous les domaines qui nécessitent le passage par l'expérimentation ou par la simulation.

Dans le cas de l'énergétique du Bâtiment, le nombre de variables d'entrée des modèles, comme vu précédemment, est souvent important. Le nombre exhaustif d'expériences à réaliser, pour parcourir l'ensemble des domaines de variations des inputs est ainsi conséquent et le temps de

calcul est onéreux voire irréaliste. Nous avons décrit précédemment les méthodologies d'optimisation des performances des bâtiments via l'utilisation des algorithmes évolutionnaires. Les fonctions sont dans nos cas considérées comme des « boîtes noires », et chaque simple modification d'un paramètre par l'utilisateur nécessite un recours à des nouvelles simulations. L'utilisation des plans d'expériences et de la métamodélisation permettrait de développer des modèles de prédiction d'un système étudié, via la mise en place d'une relation entre les variables d'entrée et de sortie avec le moins de combinaisons possibles. Les fonctions étudiées auraient ainsi une forme analytique, polynomiale en l'occurrence pour notre étude, et leur exploitation devient ainsi plus aisée avec un temps de calcul moindre.

### 1.3.2. Etat de l'art et définitions

Dans notre cas d'étude, nous nous intéressons à la modélisation par une relation polynomiale entre le modèle étudié et ses inputs. Cette relation polynomiale peut être linéaire ou quadratique (ou d'ordre plus élevé), avec ou sans interactions.

Le choix d'une matrice d'expérience est l'objectif primordial des plans d'expériences, car il permet la mise en place d'un modèle avec une meilleure précision et un nombre minimal de combinaisons. Plusieurs types de plans d'expérience ont ainsi été utilisés dans la littérature ; nous pouvons citer les plans factoriels complets, les plans factoriels fractionnaires, les plans pour surface de réponse, les plans composites etc.

Un plan d'expérience de dimension  $d$  peut s'écrire, si on considère un ensemble de  $N$  vecteurs d'entrées ou facteurs  $x_i$  ( $i$  entre 1 et  $d$ ) :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & \cdots & x_{Nd} \end{pmatrix}$$

L'objectif étant ainsi de choisir un nombre  $N$  de points couvrant le mieux possible le champ de valeurs que peuvent prendre les entrées, afin que l'ensemble des valeurs obtenues pour la sortie  $y$  soit le plus représentatif de tous les cas possibles.

Nous allons présenter ci-dessous les types de plans d'expérience les plus utilisés dans la littérature.

#### 1.3.2.1. Plans factoriels complets

Il s'agit du type de plans le plus exhaustif, car il consiste à étudier l'ensemble des combinaisons possibles des facteurs d'entrée. Si on a  $n_1, \dots, n_n$  facteurs à étudier avec  $m_1, \dots, m_n$  niveaux chacun, le nombre de combinaisons à étudier est ainsi de  $n_1^{m_1} * \dots * n_n^{m_n}$ . On note la facilité de la construction de ce plan, cependant il est souvent irréaliste de réaliser l'ensemble de ces combinaisons quand le nombre de paramètres et de niveaux augmente.

### 1.3.2.2. Plans factoriels fractionnaires

Pour pallier le nombre élevé de combinaisons du plan complet, les plans factoriels fractionnaires permettent de réduire le nombre d'équations. On ne parcourt qu'un sous-ensemble déterminé ou une "fraction" des essais du plan factoriel complet. Par exemple, pour étudier les effets éventuels de 7 facteurs (chacun à 2 niveaux), on peut effectuer 64 essais (la moitié du plan complet), 32 essais (le quart du plan complet), 16 essais (le huitième du plan complet), 8 essais (le seizième du plan complet) etc. Le fractionnement d'un plan doit cependant obéir à des règles d'organisation.

Les deux types de plans d'expérience précédents ont été utilisés par Filfili (57) pour prédire la consommation énergétique annuelle d'un bâtiment tertiaire en France, à travers un modèle polynomial. L'étude a démontré que l'utilisation des plans fractionnaires permet d'avoir une bonne prédiction du modèle avec une réduction importante du nombre de simulations requis par la méthode des plans complets.

### 1.3.2.3. 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. 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. Les plans D-optimaux ont été utilisés par Z. Romani et Al (58) pour développer une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception ou la réhabilitation énergétique des bâtiments. Jaffal (59) a également développé des modèles de prédiction des besoins énergétiques de chauffage et de climatisation d'une maison individuelle par l'utilisation de ces plans.

### 1.3.2.4. Plans composites

Les plans composites sont souvent utilisés en expérimentation classique pour approcher des surfaces de réponse de degré 2. Il est possible de générer différents plans de ce type en faisant varier la distance entre le point central et les points aux bords du domaine. On peut citer par exemple, les plans composites centrés ordinaires, les plans composites à faces centrées, les plans composites centrés inscrits, etc.

### 1.3.2.5. Plans de Box-Behnken

En termes de nombre de points, un plan de Box-Behnken est comparable à un plan composite en dimension 3 et 4. A noter qu'il n'existe pas de Box-Behnken en dimension 2. Ces plans ayant leurs points sur les axes factoriels du domaine, ils ne remplissent pas correctement l'espace.

### 1.3.2.6. Autres plans

Plusieurs autres types de plans existent dans la littérature, nous pouvons aussi citer les tableaux orthogonaux, les suites de Halton, de Hammersley, de Sobol, de Faure etc.

### 1.3.2.7. Latin Hypercube Sampling

Un hypercube latin à  $n$  points et  $d$  variables est une matrice  $n \times d$  dont chacune des colonnes est une permutation de l'ensemble  $\{1, 2, \dots, n\}$ . On le note  $LHS(n, d)$  (60). La méthode permet d'assurer la non-redondance de l'information au travers d'une bonne répartition des projections sur les axes factoriels.

Un hypercube latin à  $n$  points sur  $[0,1]^d$ , est défini par l'ensemble de points  $X^i$  tel que :

$$X_j^i = \frac{\pi_j(i) + U_j^{(i)}}{n}$$

Avec  $i$  compris entre 1 et  $n$  et  $j$  entre 1 et  $d$ .  $\pi_j$  est une permutation de 1 à  $n$  et  $U_j^{(i)} \sim U[0,1]$  est une valeur aléatoire de distribution uniforme sur  $[0,1]$ .

Nous allons utiliser ce type de plans dans le chapitre 4 de ce manuscrit.

### 1.3.3. Métamodélisation

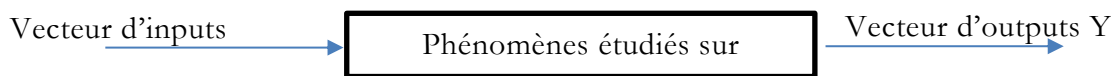
La métamodélisation consiste à reproduire un phénomène réel par un modèle mathématique. Les étapes pour produire une métamodélisation sont les suivantes :

- Obtention d'un vecteur d'inputs exhaustif via les méthodes de plans d'expériences ;

$$\text{Vecteur d'inputs} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & \cdots & x_{Nd} \end{pmatrix}$$

Avec  $N$  est le nombre d'expériences et  $d$  le nombre de paramètres.

- A partir du modèle étudié, dans notre cas la fonction « Boite noire *TRNSYS* » :



$$\text{Nous obtenons le vecteur de sortie } Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}$$

- Grâce à  $X$  et  $Y$  et aux techniques de métamodélisation, décrites ci-dessous, nous générons le nouveau métamodèle.

Nous considérons que les modèles étudiés peuvent être avec ou sans interactions, avec des degrés différents.

### 1.3.3.1. Modèle linéaire

Il s'agit d'un modèle simple à mettre en place. La formulation mathématique est donnée ci-dessous :

$$Y = a_0 + \sum_1^n a_i \cdot X_i$$

Avec  $Y$  est la réponse du modèle,  $X_i$  sont les paramètres d'entrée et  $a_i$  est le coefficient à déterminer.

Notons :

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{N1} & \cdots & x_{Nd} \end{pmatrix}$$

On s'intéresse à une variable aléatoire réelle  $Y$  qui dépend d'un vecteur aléatoire  $X$  et on cherche à expliquer la variation de  $Y$  à partir des variations de  $X$ . Pour cela on se place dans le cadre d'un modèle linéaire où  $E[Y|X]$  est linéaire.

L'ajout de la colonne unitaire permet d'avoir la valeur du coefficient  $a_0$ . Considérons la matrice  $\theta$  des coefficients  $a_i$  à estimer, et  $Y$  la matrice colonne des résultats d'expérimentations.

$X$  étant une matrice rectangulaire de dimension  $N \times (d + 1)$ , avec  $N$  est le nombre d'expériences et  $d$  le nombre de paramètres.

On dit que le modèle est identifiable, s'il existe un unique vecteur  $\theta \in R^{d+1}$  tel que  $E[Y] = X\theta$ . Ceci est vérifié si le rang de  $X$  est  $d + 1$  (61).

On appelle estimateur des moindres carrés de  $\theta$ , la valeur  $\hat{\theta}$  qui minimise :

$$\theta \rightarrow \Delta(\theta) = \|Y - X\theta\|^2$$

La matrice  $X^t \cdot X$  est inversible et la matrice de projection orthogonale sur  $\text{Vect}(X)$  est :

$$H = X(X^t X)^{-1} X^t$$

L'estimateur  $\hat{\theta}$  de  $\theta$  satisfait  $\hat{\theta} = X(X^t X)^{-1} X^t Y$ .

D'après le théorème de Gauss-Markov, l'estimateur des moindres carrés ordinaires est le meilleur estimateur linéaire sans biais du vecteur des coefficients  $a_i$  (62).

### 1.3.3.2. Modèle linéaire avec interactions

Le modèle s'obtient en rajoutant un terme d'interactions au précédent modèle.

$$Y = a_0 + \sum_1^n a_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j$$

Le terme  $\sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j$  décrit les interactions entre les paramètres du modèle. La matrice X s'écrit dans ce cas :

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1d} & x_{11}x_{12} & \cdots & x_{1d-1}x_{1d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{N1} & \cdots & x_{Nd} & x_{N1}x_{N2} & \cdots & x_{Nd-1}x_{Nd} \end{pmatrix}$$

### 1.3.3.3. Modèle quadratique avec interactions

$$Y = a_0 + \sum_1^n a_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_1^n a_{ii} \cdot X_i^2$$

La matrice X s'écrit dans ce cas :

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1d} & x_{11}x_{12} & \cdots & x_{1d-1}x_{1d} & x_{11}^2 & \cdots & x_{1d}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{N1} & \cdots & x_{Nd} & x_{N1}x_{N2} & \cdots & x_{Nd-1}x_{Nd} & x_{N1}^2 & \cdots & x_{Nd}^2 \end{pmatrix}$$

Gelman et al déconseillent selon leur étude l'utilisation des régressions polynomiales d'ordre élevé et recommandent l'utilisation des modèles linéaires et quadratiques (63). Ce constat est confirmé dans le chapitre 4 de ce mémoire.

Pour réaliser nos modèles de régression, nous avons recours aux techniques des Réseau de Neurones Artificiels (RNA).

### 1.3.4. Réseau de Neurones Artificiels ANN

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des modèles mathématiques non linéaires de type « *black-box* » (boîte noire). Leur principe repose sur l'apprentissage à la manière des réseaux de neurones biologiques dont ils tirent leur nom. L'apprentissage donne la capacité d'approcher un phénomène à partir des couples entrée-sortie enregistrés sur un système.

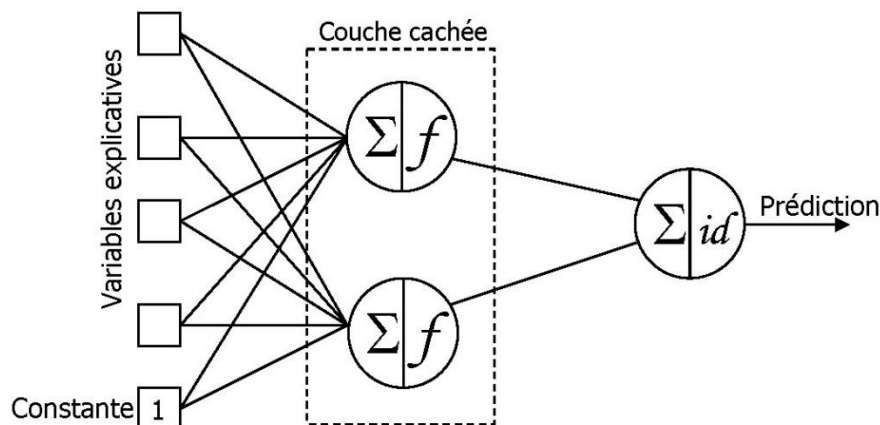


Figure 3-11 - Réseau de Neurones

Les coefficients du modèle sont calculés afin que les valeurs prédites soient les plus proches possibles de celles qui sont observées.

Le comportement du neurone artificiel sera assez semblable : il va chercher à ajuster un coefficient associé à chaque information entrante (on parle de poids synaptique) afin de réduire une fonction d'erreur. La bibliothèque *Scikit-learn* sur Python permet de réaliser nos régressions linéaires et polynomiales.

### 1.3.5. Outils de comparaison des modèles

Pour comparer les méthodes de régression (linéaire, polynomiale ordre 2 ...), nous pouvons utiliser les indicateurs ci-dessous :

- *Erreur moyenne absolue* :  $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$
- *Erreur maximale* :  $\Delta_{max} = \max_{i=1}^{i=n} |y_i - \hat{y}_i|$
- *Coefficient de détermination*  $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$

Avec  $n$  le nombre d'expériences,  $y_i$  la valeur de la fonction obtenue par l'expérience  $i$ ,  $\hat{y}_i$  la valeur approchée de la fonction et  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  la moyenne des expériences. Le coefficient  $R^2$  (ou r-value) est compris entre 0 et 1. Il mesure de la qualité de la prédiction d'une régression. En effet, plus la valeur du coefficient est proche de 1, plus le modèle approché est conforme au modèle étudié.

## 2. DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL SAMOT

### 2.1. Etat de l'art des outils d'optimisation couplables à TRNSYS

Dans ce paragraphe, nous détaillons l'état de l'art des outils disponibles permettant de faire des couplages avec le logiciel TRNSYS, pour réaliser notamment des exercices d'optimisation. M. Palonen et Al. (64) a réalisé un comparatif des outils d'optimisation disponibles:

Tableau 3-1 - Comparatif des outils d'optimisation

Outils d'optimisation	Q1	Q2	Q3	Q4
<i>Opt-E-Plus</i>	Oui	Non	Non	Non
<i>GENE_ARCH</i>	Oui	Oui	Non	Non
<i>BEopt</i>	Oui	Non	Non	Non
<i>TRNOPT</i>	Non	Oui	Non	Oui
<i>MultiOpt2</i>	Non	Oui	?	Oui
<i>jEPlus + EA</i>	Non	Oui	Oui	Non
<i>GenOpt</i>	Oui	Non	Oui	Oui
<i>ModelCenter</i>	Non	Oui	Oui	Non
<i>ModeFRONTIER</i>	Non	Oui	Oui	Oui
<i>DAKOTA</i>	Oui	Oui	Oui	Oui
<i>iSIGHT</i>	Non	Oui	Non	Oui
<i>MATLAB Optimization Toolboxes</i>	Non	Oui	Oui	Non

Q1 : L'outil est-il Freeware ?

Q2 : Inclut-il des algorithmes d'optimisation multicritère ?

Q3 : Permet-il de réaliser des simulations en parallèle ?

Q4 : Permet-il d'étudier des variables discrètes en continues ?

Nous remarquons que l'ensemble de ces outils ont des avantages et des inconvénients. Les outils les plus complets ne sont pas disponibles gratuitement.

Nous présentons par la suite deux outils qui ont servi de base dans la réalisation de deux articles dans le cadre de cette thèse : les outils *GENOPT* et *MOBO*.

### 2.1.1. GENOPT

*Genopt* est un outil d'optimisation qui permet la minimisation d'une fonction étudiée, évaluée à l'aide d'un autre programme spécifique. Il a été développé pour des problèmes d'optimisation où le calcul de la fonction demande une certaine durée de traitement et où les dérivées des fonctions étudiées ne peuvent être calculées. *Genopt* peut ainsi être couplé à n'importe quel programme de simulation, à condition que ce dernier cherche ses *inputs* à partir d'un fichier sous format texte et enregistre ses *outputs* dans un fichier du même format. Les variables indépendantes peuvent être soit continues, soit discrètes, soit un mélange des deux. *Genopt* dispose d'une librairie avec des algorithmes d'optimisation uni ou multidimensionnels, locaux ou globaux, ainsi qu'avec des algorithmes d'étude paramétrique. *Genopt* est réalisé sous Java, sa plateforme est de ce fait indépendante.

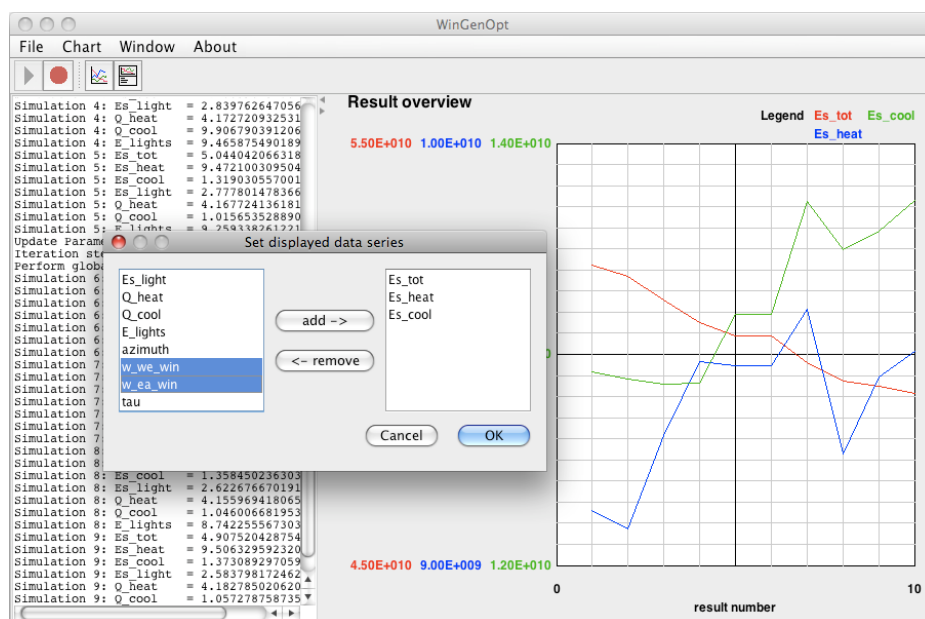


Figure 3-12- Interface de Genopt (65)

L'outil ne permet cependant pas de réaliser des optimisations à plusieurs objectifs. Plusieurs travaux de recherche ont utilisé cet outil ; L. Stephan et Al. (66) ont optimisé le taux de ventilation naturelle souhaitée en étudiant les ouvertures du bâtiment. M. Wetter et Al. (67) ont utilisé l'algorithme *Pattern Search* disponible sous *Genopt* pour optimiser les performances énergétiques d'un bâtiment.



## 2.1.2. MOBO

MOBO est un outil d'optimisation gratuit, développé par l'université de la Finlande dans le cadre du projet « *Optimal Multi-Objective Design of Integrated Renewable Energy Systems and Buildings* ». Contrairement à l'outil GenOpt, MOBO permet de réaliser des optimisations mono ou multicritères. Il présente les caractéristiques suivantes :

- *Possibilité d'étudier des variables d'entrée discrètes ou continues ;*
- *Possibilité d'ajouter des contraintes aux fonctions étudiées ;*
- *La bibliothèque de MOBO comprend plusieurs algorithmes.*
- *Comporte une interface graphique d'utilisateur ;*
- *Possibilité de visionner en temps réel l'évolution du processus d'optimisation via deux graphes personnalisables ;*
- *Possibilité de réaliser des simulations en parallèle.*

## 2.2. Genèse de l'outil SAMOT

Nous avons utilisé les deux outils Genopt et Mobo dans les travaux de recherche (68) et (69). Nous avons constaté que ces outils ont des interfaces indépendantes des logiciels de simulation thermique dynamique, mais n'offrent pas toute la flexibilité souhaitée à l'utilisateur pour programmer librement ses sorties, afficher et choisir ses méthodologies. Aucun de ces outils ne permet aux utilisateurs de réaliser des analyses de sensibilité, ni de faire des régressions polynomiales pour modéliser les fonctions TRNSYS étudiées et gagner en temps de calcul. Pour ces raisons, nous avons préconisé dans notre cas d'étude, la création d'un outil Opensource, sous *Python*, qui permet de réaliser à la fois des analyses de sensibilité, des optimisations mono et multicritère et des régressions polynomiales sous une même interface graphique. Nous présentons notre outil dans les paragraphes suivants. Cet outil est mis à disposition gratuitement aux utilisateurs de TRNSYS (toutes les versions sont supportées), et est pensé pour être d'utilisation intuitive. Les utilisateurs non avertis peuvent apprendre en quelques clics à l'utiliser de manière efficace, sans avoir de connaissance préalable en programmation Python.

## 2.3. Etape de conception du logiciel

### 2.3.1. La définition globale du problème, du besoin et du cahier des charges

La définition du besoin pour créer SAMOT est :

- Le manque d'outils facilement couplables à TRNSYS et gratuits, qui permettent de compléter ce logiciel avec des fonctions de sorties « boîte-noire » ;
- L'indisponibilité d'outils permettant de réaliser des analyses de sensibilité locales ou globales, afin de bien comprendre le comportement des systèmes modélisés sous TRNSYS ;
- L'indisponibilité d'outils permettant de réaliser des modélisations polynomiales des fonctions boites noires étudiées ;

- Le manque de flexibilité des outils d'optimisation proposés dans le marché ;
- La nécessité d'avoir un outil qui affiche visuellement les résultats sous forme de diagrammes exploitables, ou de données sous Excel pour traitement ultérieur si besoin ;
- Maintenabilité ou ajustement pas possible des outils proposés sur le marché, vu l'indisponibilité des codes sources détenus par leurs concepteurs, et l'utilisation de langage de programmation non open source pour la conception de ces logiciels ;
- Les outils ne sont pas forcément intuitifs à l'utilisation.

Notre outil doit ainsi répondre à l'ensemble des points de ce cahier des charges :

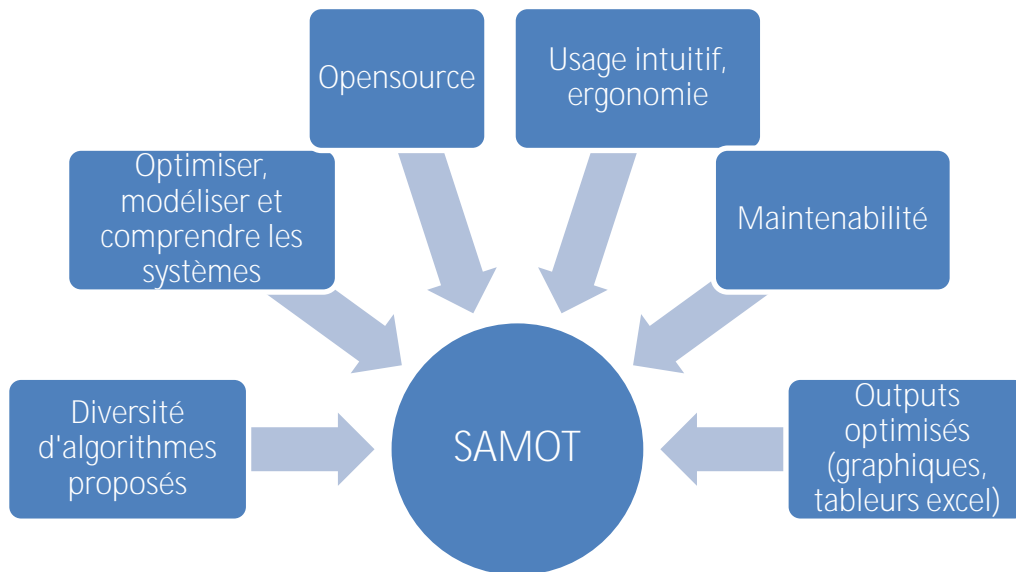


Figure 3-13 - Cahier des charges de conception du logiciel SAMOT


### 2.3.2. Utilisateurs ciblés

Les utilisateurs cibles de l'outil SAMOT sont :

- Utilisateurs du logiciel TRNSYS : étudiants, concepteurs, ingénieurs, chercheurs.
- Utilisateurs avec ou sans connaissance des langages de programmation.

Le logiciel sera mis à disposition en Open source pour l'ensemble de ces utilisateurs.

### 2.3.3. Environnement de travail

L'environnement de développement est  python™. Nous allons utiliser plusieurs bibliothèques de *GitHub* dans le cadre de cette thèse.

Les principales bibliothèques utilisées sont :

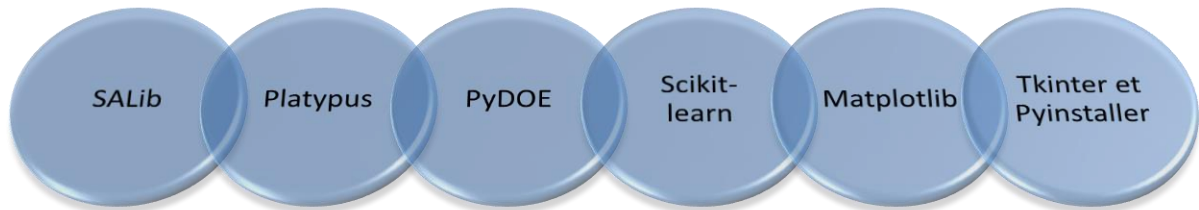


Figure 3-14 - Principales bibliothèques *Python* utilisées

### 2.3.3.1. SALib (Sensitivity Analysis Library)

*SALib* (70) est une librairie permettant de réaliser les analyses de sensibilité. Il s'agit d'une librairie complète, qui permet de générer les indices de sensibilité selon plusieurs méthodes :

- *Sobol Sensitivity Analysis* (52) (71)
- *Méthode de Morris*
- *Fourier Amplitude Sensitivity Test* (FAST)
- *Random Balance Designs - Fourier Amplitude Sensitivity Test* (RBD-FAST)
- *Delta Moment-Independent Measure*
- *Derivative-based Global Sensitivity Measure* (DGSM) (72)
- *Fractional Factorial Sensitivity Analysis*

### 2.3.3.2. Platypus

*Platypus* (73) est une bibliothèque d'optimisation multi ou monoobjectif disponible sous Python. Elle contient des algorithmes évolutionnaires, permettant de réaliser des optimisations sur des fonctions type boîte noire. Les algorithmes proposés sont:

- NSGAI (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm I)
- NSGAII (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)
- NSGAIII (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III)
- CMAES (covariance matrix adaptation evolution strategy)
- GDE3 (generalized differential evolution 3)
- IBEA (indicator based evolutionary algorithm)
- MOEAD (multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition)
- OMOPSO (Particle Swarm Optimization)
- SMPPO (Multi-objective particle swarm optimization)
- SPEA2 (The Strength Pareto Evolutionary Algorithm-2)
- EpsMOEA.

### 2.3.3.3. PyDOE

La bibliothèque *PyDOE* (74) (*Design of Experiment*) d'algorithmes dédiés aux plans d'expériences. Plusieurs types de plans d'expérience peuvent être utilisés (hypercubes latins, Plans de Box-Behnken, plans D-optimaux ...).

#### 2.3.3.4. *Matplotlib*

Matplotlib (75) est l'un des packages Python les plus utilisés pour la représentation de graphiques en 2D et 3D. Il fournit aussi bien un moyen rapide de visualiser des données grâce au langage Python, que des illustrations de grande qualité dans divers formats.

Nous utilisons cette librairie pour permettre la représentation graphique de nos résultats (indices de sensibilité, résultats des optimisations ...).

#### 2.3.3.5. *Scikit-learn*

Scikit-learn (76) est la bibliothèque de « *Machine Learning* » de Python. Nous l'utilisons pour réaliser les régressions via les Réseaux de Neurones Artificiels.

#### 2.3.3.6. *Tkinter & Pyinstaller*

Tkinter (77) sert à réaliser des interfaces graphiques pour l'utilisateur (GUI) à l'aide d'un ensemble de composants graphiques (widgets).

Pyinstaller (78) permet d'avoir une interface graphique en mode exécutable, à partir du code python de l'interface graphique sur Tkinter. Ainsi, les utilisateurs n'ont pas à utiliser une console Python pour utiliser la GUI.

### 2.3.4. Etapes de création de SAMOT

Les étapes de création de l'outil sont données ci-dessous.



Figure 3-15 - Etapes de création de SAMOT

La maintenabilité du logiciel est également facile à réaliser, car il est possible de modifier le code Python sous une console python, et ensuite créer un nouvel exécutable de l'outil (nouvelle version).

## 2.4. Architecture globale du système

### 2.4.1. Comment interagir avec TRNSYS ?

Pour chaque projet modélisé (bâtiment, système ...), TRNSYS crée, entre autres, deux fichiers *inputs* :

- Un fichier bâtiment (extension .B17 sur TRNSYS 17, .Bui sur TRNSYS 16 ...) : ce fichier comporte le détail de la configuration du bâtiment modélisé (murs, fenêtres, matériaux utilisés ...)
- Un fichier avec le détail des autres composants, à savoir le lecteur des données météo, les équations utilisées etc. Ce fichier a une extension .dck.

Nous manipulons pour chaque étude ces deux fichiers afin de pouvoir modifier les combinaisons des paramètres d'entrée à étudier, et ainsi de réaliser les optimisations ou les analyses de sensibilité.

SAMOT va ainsi demander à l'utilisateur de spécifier le chemin d'accès (dans le répertoire de travail) de ces deux fichiers. Le chemin de l'exécutable TRNSYS (Trnexe.exe) qui permet de lancer les simulations TRNSYS est également à spécifier.

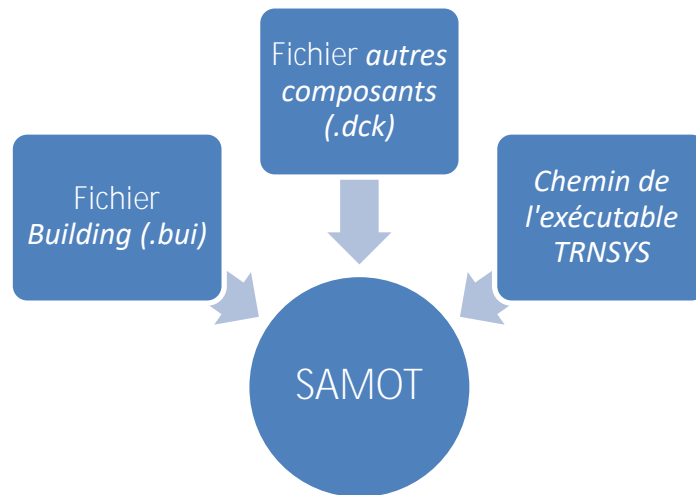


Figure 3-16 - Interaction SAMOT - TRNSYS

SAMOT peut ainsi interagir avec toutes les versions de TRNSYS.



Figure 3-17 - Logos des récentes versions de TRNSYS

La méthode générale des couplages TRNSYS et python est donnée dans la figure 3-18.

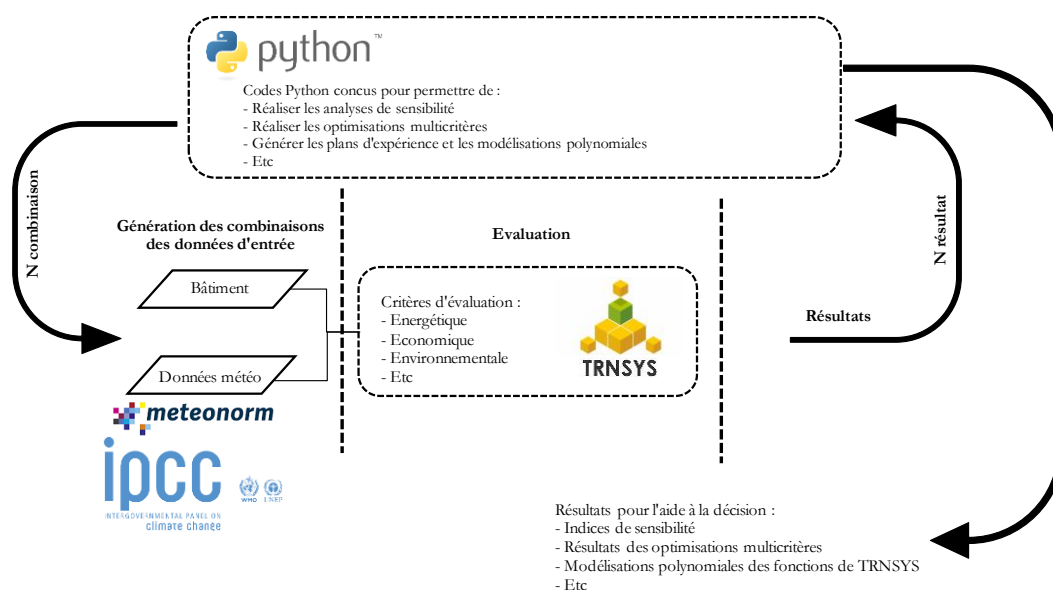


Figure 3-18 - Méthode générale sous Python

## 2.4.2. Comment spécifier les paramètres à étudier ?

Afin d'indiquer les paramètres à étudier, nous avons pensé à un moyen intuitif et facile pour leur sélection. Ainsi, l'utilisateur doit renseigner ces derniers dans un fichier texte, avec le nom du paramètre à varier (le même nom doit être reporté dans la valeur du paramètre dans les fichiers .bui ou .dck), sa borne inférieure & supérieure de variation s'il s'agit d'un paramètre continu, ou bien ses différentes valeurs possibles s'il est discret.

La saisie est ainsi faite comme ci-dessous :

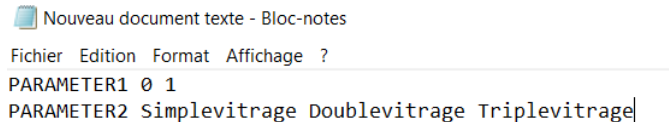


Figure 3-19 - Exemple de saisie des inputs

Le premier paramètre sera à varier entre 0 et 1 et le deuxième sur les 3 valeurs proposées. Le chemin d'accès de ce fichier est demandé à l'utilisateur.

Un fichier similaire est à faire pour chercher les fonctions-objectifs à étudier.

## 2.4.3. Interface

L'outil comporte plusieurs onglets, un pour les analyses de sensibilité, un pour les optimisations et un dernier dédié à la nouvelle méthode d'optimisation proposée dans le cadre de cette thèse, via les régressions polynomiales et les algorithmes génétiques.

### 2.4.3.1. Onglet Analyse de sensibilité

Le premier onglet permet de réaliser les analyses de sensibilité sous TRNSYS, selon la méthode choisie par l'utilisateur.

Les paramètres par défaut des méthodes sont stockés dans un fichier Excel joint avec l'outil, et l'utilisateur peut les changer avant de lancer l'outil en mode « utilisateur avancé ».

La méthodologie est la suivante :

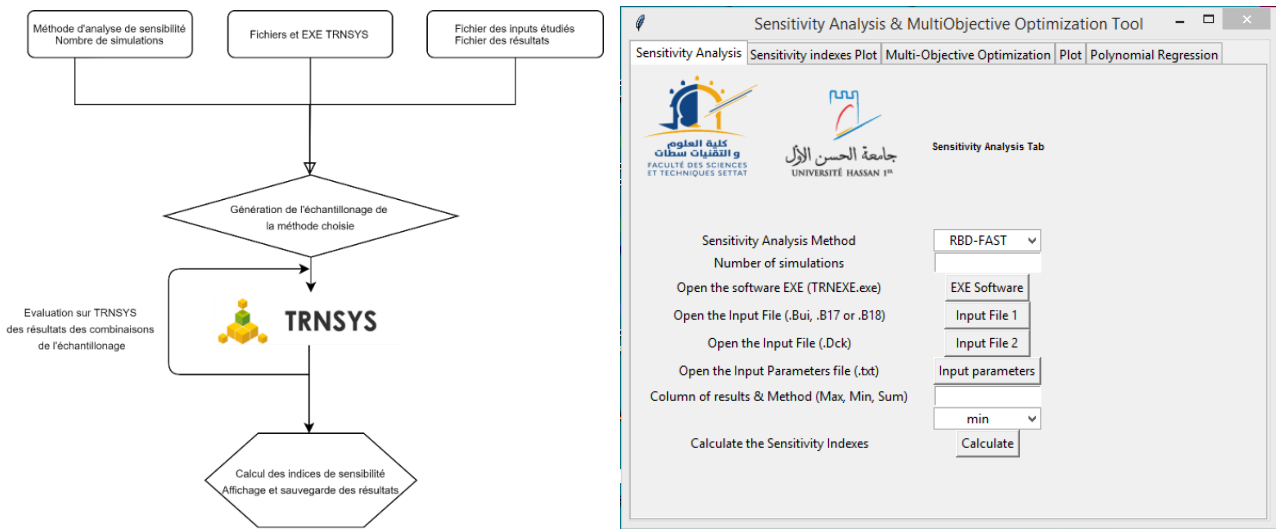


Figure 3-20 - Méthodologie de l'analyse de sensibilité et interface SAMOT

### 2.4.3.2. Onglet Optimisation Multicritère

Cet onglet de l'outil SAMOT permet de réaliser des optimisations, à un ou plusieurs objectifs, avec ou sans contraintes. L'utilisateur a le choix de faire des combinaisons de contraintes des fonctions étudiées, avec un large panel de choix : les opérateurs de *numpy* (maximum, minimum ...), les opérations usuelles de multiplication et de soustraction etc.

Les paramètres étudiés peuvent également être soit de type continu ou discret. La réalisation des optimisations peut se faire sur plusieurs processeurs de la machine utilisée, en réalisation du *Multithreading*.

Toutes ces options rendent l'utilisation de l'outil très variée et adaptée aux utilisations de recherche et de conception sur TRNSYS.

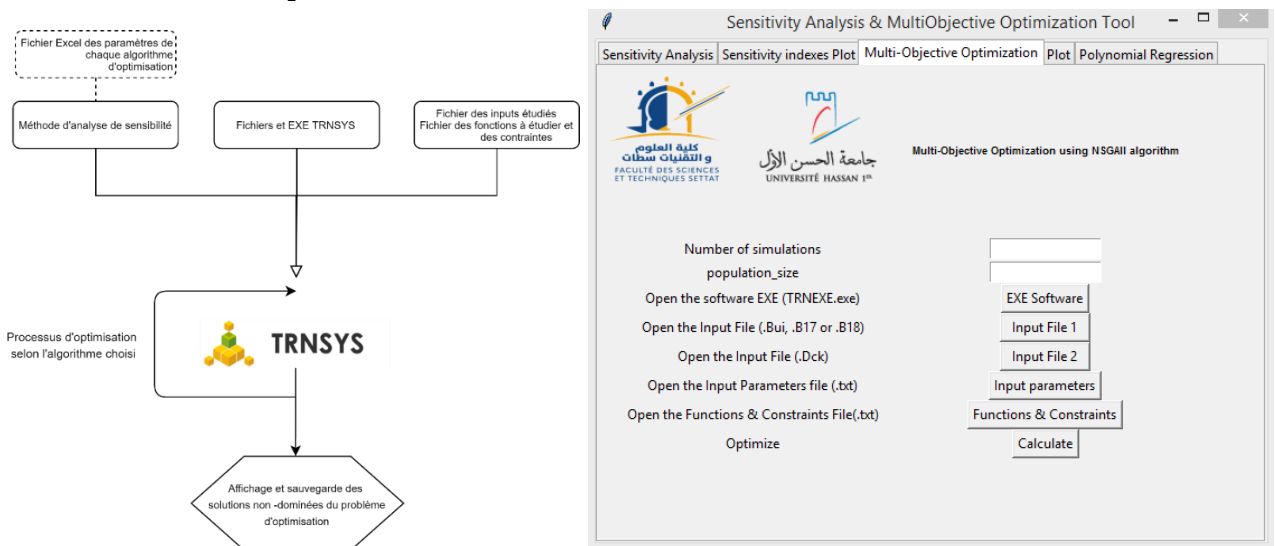


Figure 3-21 - Méthodologie d'optimisation sur TRNSYS et interface SAMOT pour l'optimisation avec l'algorithme NSGA-II

### 2.4.3.3. Nouvelle méthodologie d'optimisation développée dans le cadre de la thèse

Outre la nouveauté de proposer un outil qui permet de réaliser des analyses de sensibilité directes sur TRNSYS, SAMOT propose une nouvelle méthodologie pour gagner en temps de calcul, qui consiste en :

- **Etape 1 :** Réaliser un plan d'expérience LHS, avec le nombre de simulations donné par l'utilisateur dans l'interface et calcul des résultats sur TRNSYS ; à l'issue de cette étape, des résultats d'analyse de sensibilité sont proposés par la méthode « *Delta Moment-Independent Measure* » ou la méthode « *RBD-FAST* » ;
- **Etape 2 :** Modéliser les outputs de TRNSYS avec des fonctions polynomiales, avec la régression type ANN ;
- **Etape 3 :** Réaliser des optimisations avec algorithmes génétiques sur les fonctions modélisées par la régression polynomiale, et sauvegarde des combinaisons des solutions non-dominées ;
- **Etape 4 :** Evaluer la valeur exacte des fonctions avec les combinaisons des solutions non-dominées par simulations sur TRNSYS ;
- **Etape 5 :** Ajout des combinaisons et des résultats au plan d'expérience LHS ;
- **Etape 6 :** Réalisation de nouvelles métamodélisations avec le nouvel échantillonnage ;
- **Etape 7 :** Réaliser des optimisations avec algorithmes génétiques sur les fonctions modélisées par la régression polynomiale, et sauvegarde des combinaisons des solutions non-dominées ;
- **Etape 8 :** Evaluer la valeur exacte des fonctions avec les combinaisons des solutions non-dominées par simulations sur TRNSYS
- **Etape 9 :** Proposition des solutions du problème d'optimisation

Cette méthode combine les forces de la métamodélisation et des algorithmes génétiques.

Les étapes 5 à 8 sont à répéter selon les critères indiqués par l'utilisateur (nombre d'itérations, erreur  $R^2$  à atteindre etc.).

La méthode permet également, à travers l'utilisation de l'échantillonnage LHS, de calculer les indices de sensibilité selon la méthode « *Delta Moment-Independent Measure* » ou la méthode « *RBD-FAST* ».

En plus, en modélisant les fonctions boîtes noires, les opérations d'optimisation, d'analyse de sensibilité ou autre ne nécessitent qu'un faible temps de calcul, de l'ordre de quelques minutes en général.

### **3. PREMIERE APPLICATION DE SAMOT : OPTIMISATION MULTICRITERE POUR CHOISIR LES TYPES DES ISOLANTS**

#### **3.1. Paramètres d'entrée**

Nous allons clore ce chapitre par une première optimisation multicritère, permettant de choisir les types d'isolants pour l'étude. Le guide technique de l'isolation thermique propose des isolants par type de paroi (42). La laine de roche est par exemple adaptée à tous les supports, la perlite n'est cependant à prescrire que pour les toitures et planchers bas ...



Tableau 3-2 - Choix de l'isolant en fonction de la paroi (42)

Choix de l'isolant en fonction de la paroi				
Types d'isolants	Murs	Cloisons	Plafonds	Toitures et planchers bas
Laine de verre	Oui	Oui	Oui	Non
Laine de roche	Oui	Oui	Oui	Oui
Polystyrène expansé (PSE)	Oui	Oui	Non	Non
Polystyrène extrudé (XPS)	Non	Oui	Non	Oui
Polyuréthane	Oui	Non	Non	Oui
Laine de chanvre	Oui	Oui	Oui	Non
Perlite	Non	Non	Non	Oui
Liège expansé	Oui	Oui	Oui	Oui

Sur la base de cette répartition, nous allons optimiser le choix d'isolants pour une configuration à 10 mm d'épaisseur. Les critères à optimiser sont :

- L'énergie finale en kWh par an (de chauffage et de climatisation) : Etant un output du logiciel TNSYS selon les combinaisons ci-dessous ;
- Le coût de mise en œuvre en dirhams (critère économique) ;
- L'énergie grise associée en kWh (critère environnemental).

Le calcul des deux derniers objectifs se fait sur la base des combinaisons du tableau ci-dessous :

Tableau 3-3 - Propriétés des isolants

Support	Isolant	$\lambda$ en W/m.K	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	C en J/Kg.K	Energie grise kWh/m <sup>3</sup>	Prix en Dh TTC
Murs extérieurs	Laine de verre	0,0375	36,5	1030	250	39,24 à 104,6 Dh/m <sup>2</sup> en 100 mm
	Laine de roche	0,036	85	920	150	65,4 à 130,8 Dh/m <sup>2</sup> en 100mm
	Polystyrène expansé	0,032	20	1450	450	130,8 Dh/m <sup>2</sup> pour 100mm isolant et parement 10 cm
	Polyuréthane	0,026	39	1400	1100	261,6 Dh/m <sup>2</sup> pour 100mm d'épaisseur
	Laine de chanvre	0,043	37,5	1500	50	196,2 Dh/m <sup>2</sup> pour 100mm d'épaisseur
	Liège expansé	0,0385	220	1 700	85	de 130,8 Dh/m <sup>2</sup> jusqu'à 392,4 Dh/m <sup>2</sup> selon épaisseur et densité
Toiture et plancher bas	Laine de roche	0,036	85	920	150	65,4 à 130,8 Dh/m <sup>2</sup> en 100mm
	Polystyrène extrudé	0,0325	30	1400	850	196,2 à 261,6 Dh/m <sup>2</sup> pour 100mm d'épaisseur
	Polyuréthane	0,026	39	1400	1100	261,6 Dh/m <sup>2</sup> pour 100mm d'épaisseur
	Perlite	0,0525	220	1000	230	2485,2 Dh/m <sup>3</sup>
	Liège expansé	0,0385	110	1 700	85	de 130,8 Dh/m <sup>2</sup> jusqu'à 392,4 Dh/m <sup>2</sup> selon épaisseur et densité

## 3.2. Résultats

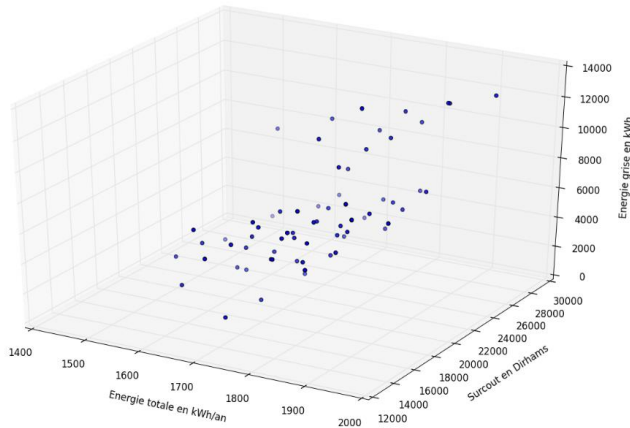


Figure 3-22- Représentation 3D des résultats

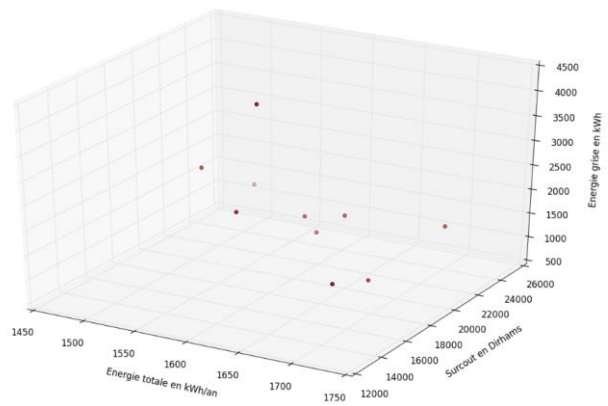


Figure 3-23 - Représentation 3D du front de Pareto

Les points en rouge sur la figure 3-23 correspondent aux solutions non-dominées du front de Pareto pour les 3 critères. Nous allons faire des projections en 2D des combinaisons étudiées et de celles du front de Pareto :

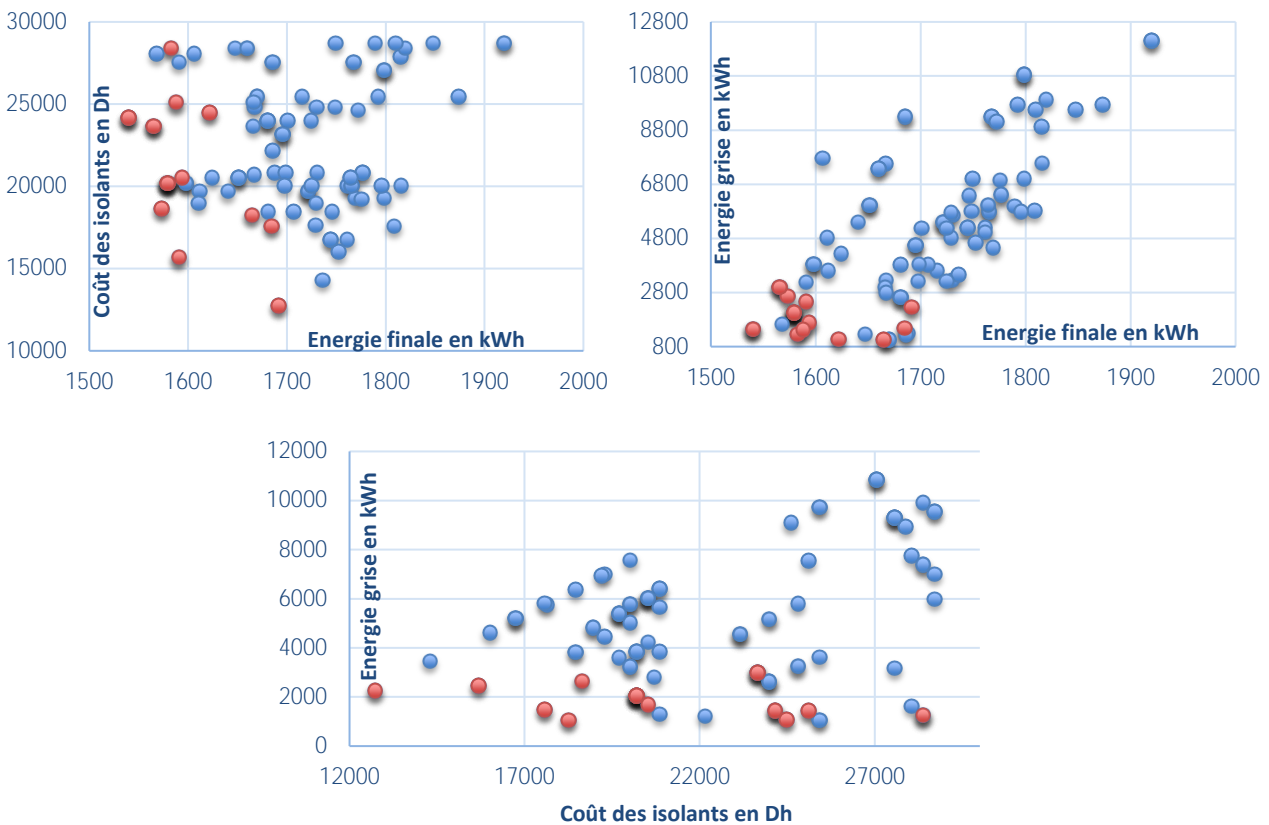


Figure 3-24 - Projection 2D des solutions

Parmi les solutions non-dominées du front de Pareto, nous choisissons la solution ci-dessous, qui est pratique vu la disponibilité des isolants « *laine de roche* » et « *laine de verre* » sur le marché marocain des isolants :

Tableau 3-4- Isolants retenus

Isolant plancher bas	Isolant plafond	Isolant murs extérieurs	Energie finale en kWh	Coût en DH	Energie grise en kWh
<b>Laine de roche</b>	<b>Laine de roche</b>	<b>Laine de verre</b>	1691	12740	2250

Concernant le choix des briques pour les murs extérieurs, l'agence marocaine pour l'efficacité énergétique (AMEE), a publié les résultats de tests, réalisés dans des laboratoires accrédités, de caractéristiques physiques et thermiques des principaux matériaux de construction au Maroc. Les échantillons proviennent de plusieurs régions. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous (79) :

Tableau 3-5 - Propriétés des briques

Type	Région	Type	Conductivité thermique équivalente W/m.K	Capacité thermique massique J/Kg.K	Masse volumique apparente kg/m <sup>3</sup>	Diffusivité thermique 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	Effusivité thermique J/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> .K
<b>Briques rouges</b>	<b>Tanger</b>	6 trous	0,195	731	931	2,86	364
		8 trous	0,189	731	912	2,84	355
		12 trous	0,207	731	660	4,28	316
	<b>Nador</b>	6 trous	0,213	734	975	2,97	390
		8 trous	0,206	734	954	2,94	380
		12 trous	0,222	734	690	4,39	336
	<b>Salé</b>	6 trous	0,188	755	881	2,82	353
		8 trous	0,183	755	862	2,82	345
		12 trous	0,2	755	624	4,25	307
	<b>Berrechid</b>	<b>6 trous</b>	<b>0,184</b>	<b>760</b>	<b>903</b>	<b>2,68</b>	<b>356</b>
		<b>8 trous</b>	<b>0,179</b>	<b>760</b>	<b>884</b>	<b>2,67</b>	<b>347</b>
		<b>12 trous</b>	<b>0,194</b>	<b>760</b>	<b>640</b>	<b>4,06</b>	<b>310</b>
	<b>Oujda</b>	6 trous	0,209	729	1011	2,83	392
		8 trous	0,203	729	990	2,81	383
		12 trous	0,219	729	716	4,2	338
	<b>Marrakech</b>	6 trous	0,186	735	924	2,74	355
		8 trous	0,181	735	905	2,72	347
		12 trous	0,199	735	655	4,13	309
<b>Blocs de béton</b>	<b>Nador</b>	6 trous	0,539	813	728	9,11	565
		9 trous	0,506	813	779	7,99	566
	<b>Oujda</b>	6 trous	0,578	846	743	9,2	603
		9 trous	0,545	846	795	8,11	606

Nous constatons que parmi les échantillons étudiés, ceux produits à Berrechid (en rouge dans le tableau) présentent les meilleures conductivités thermiques. En outre, grâce à la proximité

de Berrechid de Settat, l'utilisation de ces briques permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre dues au transport. Nous choisissons ainsi les briques produites localement pour notre étude d'optimisation.

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'outil SAMOT développé dans le cadre de la thèse, afin de compléter et de proposer de nouvelles fonctionnalités pour utiliser efficacement le logiciel TRNSYS et pour participer à l'aide à la décision dans la conception des bâtiments à haute efficacité énergétique.

Un premier cas d'étude dont l'objectif est de choisir les isolants a été étudié. Il a permis de démontrer de l'efficacité des outils d'optimisation de notre outil.

Dans les chapitres suivants, nous allons exploiter les différentes fonctionnalités de l'outil SAMOT, dans l'optique de bien cerner le comportement de notre bâtiment modèle et d'optimiser sa conception. Un premier cas d'étude prenant en compte les impacts du réchauffement climatique sur la conception du bâtiment sera dressé, et un second permettra d'optimiser les performances du bâtiment dans les six zones climatiques du royaume.

# Chapitre 4 - Optimisation des performances énergétiques, économiques et environnementales d'un bâtiment avec SAMOT, avec prise en compte des effets du réchauffement climatique

## 1. INTRODUCTION

La question du changement climatique est partie d'une constatation des années 1960-1970 : celle d'un risque de changement majeur dans la composition chimique de l'atmosphère. Anticipée par les travaux de Revelle et Suess (80), l'augmentation du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> atmosphérique a été mise en évidence par les mesures régulières menées dès 1958 à l'observatoire du Mauna Loa, dans l'Ile d'Hawaï (81). Elle répond à des émissions de gaz à effet de serre qui se sont développées surtout après la Seconde Guerre mondiale.

Durant les dernières décennies, les changements perçus dans le climat ont causé des impacts majeurs sur les systèmes naturels et humains, sur tous les continents et à travers tous les océans. Le GIEC dans son rapport technique sur le réchauffement climatique de l'année 2014, a cartographié les événements majeurs liés au dérèglement climatique :

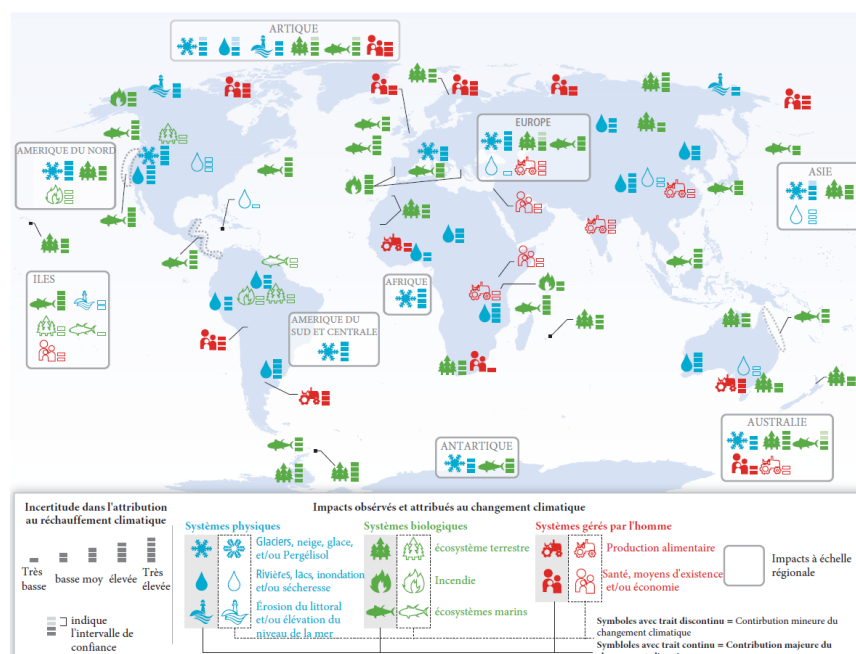


Figure 4-1 - Evénements extrêmes liés au changement climatique (82)

En Afrique, les événements extrêmes incluent les sécheresses et les inondations. Ces dernières ont des impacts majeurs sur l'économie, les ressources naturelles, les écosystèmes et sur la santé. Les inondations de la rivière Zambèze en Mozambique en 2008, par exemple, ont fait déplacer 90 000 personnes. Ces déplacements temporaires ont fini par devenir définitifs pour une bonne partie de cette population. Au Maroc, il est constaté, entre autres, que la densité des forêts diminue, indépendamment de l'exploitation humaine de ces dernières.

Sur une échelle plus globale, le réchauffement climatique engendre des dégâts majeurs à l'échelle mondiale (sur les écosystèmes terrestres et marins, les glaciers, les rivières et lacs, sur la production alimentaire et sur les économies ...). Dans ce sens, le nombre de publications scientifiques disponibles, traitant du sujet du réchauffement climatique, a plus que doublé entre 2005 et 2010. La diversité des sujets et des régions d'étude a également augmenté, même dans les pays en voie de développement (83).

La 21<sup>e</sup> conférence des parties de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques de Paris (COP 21, 30/11 au 11 décembre 2015), a annoncé que « *Le sujet de l'adaptation devra être au cœur des discussions visant l'accord de Paris et ainsi confirmer leur importance politique de premier rang, et contribuer à un développement résilient aux changements climatiques* ».

Aussi, nous présentons ci-dessous un extrait de la lettre Royale lue lors de la Conférence des Nations Unies sur les Changements Climatiques à Copenhague, décembre 2009 :

« (...) *Le Maroc, à l'instar de l'ensemble des pays, subit les effets des changements climatiques avec les spécificités que lui confèrent sa position géographique et la diversité de ses écosystèmes. C'est pourquoi notre pays fut parmi les premiers à adhérer à la prise de conscience universelle, consacrée par le Sommet de Rio, en ratifiant les conventions internationales pertinentes, et en adoptant des programmes d'action nationaux en la matière. Nous avons aussi inscrit les questions environnementales au cœur de nos programmes de développement - notamment ceux concernant l'eau - en suivant une politique pionnière et anticipatrice de mobilisation de nos ressources hydriques et de lutte contre les inondations et la sécheresse. Nous avons également lancé et mis en œuvre une Initiative Nationale pour le Développement Humain (INDH), outre des plans de développement stratégiques sectoriels, surtout dans les domaines du développement agricole et de la protection de l'environnement, ainsi que l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables. (...) En adoptant ce modèle de développement durable, le Maroc réaffirme sa forte adhésion à l'effort international de lutte contre le phénomène de réchauffement à effet de serre (...). En fait, la situation a atteint un degré de gravité qui rend impératif un engagement collectif plus fort, pour assurer la survie de l'humanité et sauvegarder notre Planète Terre. (...)* ».

Comme résultat de la bonne volonté du Royaume, ce dernier se hisse désormais comme le deuxième pays le plus performant mondialement (derrière la Suède) en termes de lutte contre le réchauffement climatique, selon le *Climate Change Performance Index 2019* (84). En effet, le Maroc a augmenté significativement sa part d'énergie renouvelable durant les cinq dernières années. Le royaume s'est doté de la plus grande centrale solaire au monde et multiplie la mise en place des centrales éoliennes. Cette politique le met bien sur les rails pour atteindre son objectif de 52% d'énergie renouvelable en 2030. Cependant, des experts nationaux soulignent le retard de mise en place des politiques énergétiques (85).

## **2. ETUDE DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR METEONORM**

Meteonorm propose d'étudier le réchauffement climatique selon 3 scénarios, définis par le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Le GIEC est un organisme intergouvernemental ouvert à tous les pays membres de l'ONU, créé en 1988 à la suite d'une initiative politique de nature internationale, dépend de l'organisation météorologique mondiale et du programme des nations unies pour l'environnement. Il a pour mission d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations

d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation (86). Les modèles sont utilisés pour anticiper ce qui se passerait dans le futur, selon plusieurs types de scénarios. Ces derniers décrivent des évolutions des émissions des gaz à effet de serre cohérentes sur le plan socio-économique.

## **2.1. Présentation des scénarios**

### **2.1.1. B1 (scénario optimiste, 2°C de réchauffement en 2100)**

Ce scénario postule une croissance économique très rapide et répartie de façon homogène sur la planète. La population mondiale atteint un maximum de 9 milliards d'individus au milieu du siècle pour décliner ensuite. L'économie est rapidement dominée par les services, les « techniques de l'information et de la communication » et dotée de technologies énergétiquement efficaces. Mais sans initiatives supplémentaires par rapport à aujourd'hui pour gérer le climat. Ce scénario est le plus optimiste des 3 présentés.

### **2.1.2. A1B (scénario moyen, 3°C)**

Elle postule une croissance économique très rapide et répartie de façon homogène sur la planète. La population mondiale atteint un maximum de 9 milliards d'individus au milieu du siècle pour décliner ensuite. De nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont introduites rapidement. La variante A1B suppose une utilisation des différentes sources énergétiques sans en privilégier une en particulier (scénario médian).

### **2.1.3. A2 (scénario pessimiste, 3.5°C)**

Elle prévoit un monde beaucoup plus hétérogène : la croissance économique et le développement des technologies énergétiquement efficaces sont très variables selon les régions et la population atteint 15 milliards d'habitants à la fin du siècle sans cesser de croître.

## 2.2. Evolution des températures selon les différents scénarios

La figure ci-dessous montre les variations des températures moyennes mondiales au cours des années observées et calculées par un exercice de scénarisation des climats futurs.

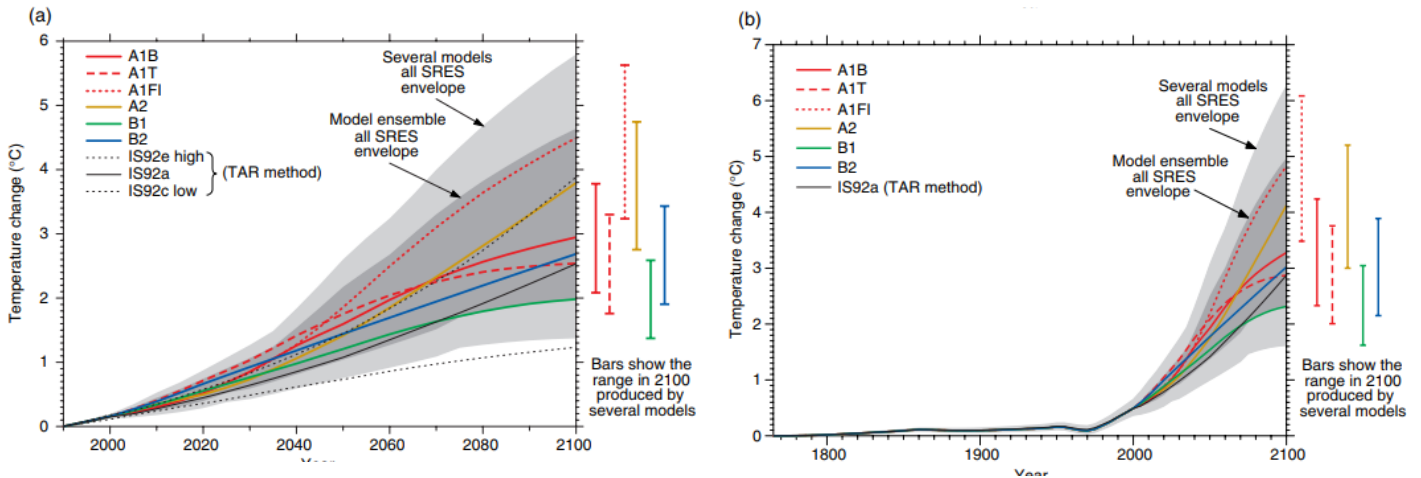


Figure 4-2 - Evolution des températures selon les différents scénarios (102)

Les barres correspondent aux incertitudes sur les différents modèles. Aujourd'hui, nous sommes à un peu moins d'un degré de réchauffement climatique. Nous observons que la limite des 2 degrés est dépassée en 2050, même pour les scénarios les moins alarmants. Pour la ville de Settat, notre analyse des températures sous forme d'une représentation « boîte à moustache » donne :

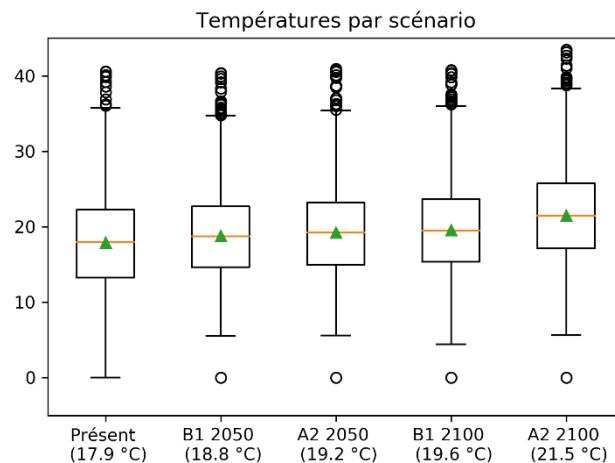


Figure 4-3 - Températures par scénario à Settat

Les températures moyennes de la ville de Settat, selon les deux scénarios B1 et A2 respectivement, passeront de 17,9°C à 18,8°C ou 19,2°C en 2050 et à 19,6°C ou 21,5°C en 2100. Dans le paragraphe suivant, nous allons calculer les degrés-jours de chauffage et de climatisation pour la ville de Settat selon les scénarios B1 et A2.



## 2.1. Evolution des degrés-jours selon les différents scénarios

### 2.1.1. Evolution des degrés-jours à Settât selon le scénario B1

Pour le scénario optimiste B1, les degrés-jours de chauffage baissent de 4,5% tous les 10 ans, et ceux de climatisation augmentent avec un rythme moyen de 5,5%. Les deux degrés-jours deviennent égaux vers l'année 2085.

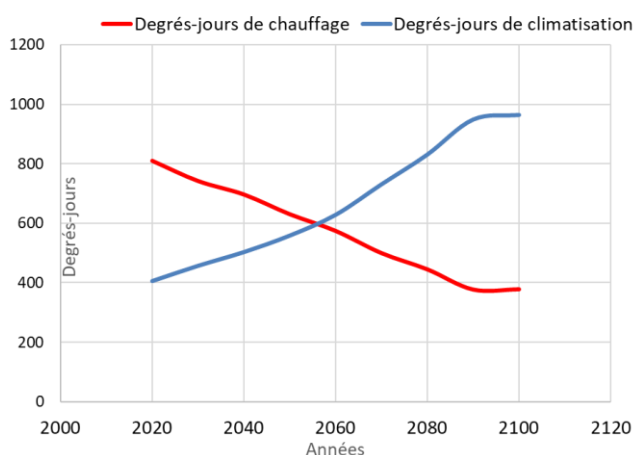


Figure 4-4 - Scénario B1

### 2.1.2. Evolution des degrés-jours à Settât selon le scénario A2

Pour le scénario pessimiste A2, nous remarquons que les degrés-jours de chauffage baissent de 10% en moyenne toutes les décennies, et les degrés-jours de climatisation augmentent de 13% sur le même intervalle. Ces deux s'égalisent aux alentours de 2055.

Nous concluons ainsi que selon l'ensemble des scénarios, la dominance actuelle des degrés-jours de chauffage sur ceux de la climatisation

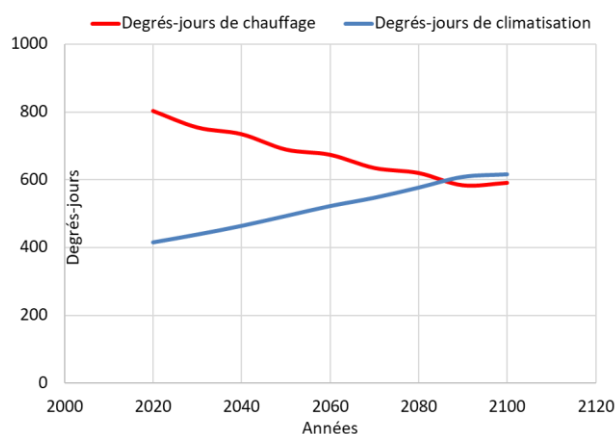


Figure 4-5 - Scénario A2

sera inversée à partir de 2050 ou au plus tard en 2080. La conception des bâtiments axée aujourd'hui sur les besoins de chauffage, sera par conséquent compromise en 2100 car les besoins de climatisation seront plus importants. Il est ainsi essentiel de prendre en considération les effets du réchauffement climatique dans la conception des bâtiments pour qu'ils soient confortables aux usagers dans l'ensemble de leurs durées de vie.

Nous réalisons dans les paragraphes suivants des optimisations des performances de notre bâtiment modèle avec les scénarios actuels et futurs.

## 3. BATIMENT MODELE

Le bâtiment modèle désigné pour l'étude est un bâtiment de superficie carré, de dimension  $5m \times 5m \times 3m$ , doté d'une baie vitrée dans chacune de ses façades. Nous considérons

une orientation plein sud du bâtiment. Le TGBV est de 25%, ce qui correspond à des fenêtres de 3,25 m<sup>2</sup>. Les fenêtres sont considérées en simple vitrage, avec les propriétés suivantes :

- $U = 5,74 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  et  $g = 0,87$ ;
- Cadre de 15% avec un  $U = 2,27 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  et  $g = 0,6$

Nous considérons un mode de gestion de l'éclairage (à travers la gestion technique du Bâtiment *GTB*), qui permet d'utiliser l'éclairage intérieur en fonction de l'irradiation horizontale ; l'éclairage est utilisé quand l'irradiation est inférieure à 120 W/m<sup>2</sup>. Pour les gains internes, nous considérons uniquement la présence d'une seule personne dans la pièce, avec un dégagement calorifique correspondant à une chaleur sensible de 60W et latente de 40W, selon la norme ISO 7730. Le bâtiment est considéré comme un modèle *mono-zone*. Les caractéristiques de l'enveloppe sont celles données dans le chapitre 2, et qui ont servi de base pour la réglementation thermique marocaine.

### 3.1. Plancher bas en contact avec le sol

Le plancher bas de notre bâtiment est en contact avec le sol. Ce dernier constitue un gisement thermique naturel important. En effet, le sol est caractérisé par une inertie thermique qui lui permet d'avoir un déphasage thermique par rapport à la température ambiante. L'amplitude journalière de la température du sol est également négligeable par rapport à l'amplitude de la température ambiante.

Cette caractéristique peut éventuellement être exploitée pour une meilleure conception des bâtiment ; Sobhy et al (87) ont démontré dans leur étude du comportement thermique d'une maison sise à Marrakech, que l'isolation thermique du plancher bas sur sol ne s'avère pas nécessaire. Les bâtiments à plancher bas sur terre plein, enterrés ou semi-enterrés peuvent bénéficier du sol pour maintenir un confort thermique acceptable.

La distribution verticale de la température du sol a été modélisée par Kasuda (88) et utilisée par G. Florides et S.Kalogirou (89) qui ont démontré que la température du sol est fonction du temps et de la profondeur du sol en dessous de la surface et est décrite par l'équation ci-dessous :

$$T = T_{mean} - T_{amp} \cdot \exp \left[ -z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}} \right] \cdot \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \cdot \left[ t_{now} - t_{shift} - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right] \right\}$$

Avec :

- $T$  = Température du sol ;
- $T_{mean}$  = Température moyenne de la zone étudiée ;
- $T_{amp}$  = Amplitude de la température de la surface ;
- $Z$  = profondeur en dessous de la surface ;
- $\alpha$  = Diffusivité thermique du sol ;

- $t_{now} = \text{Temps actuel (jour)}$  ;
- $t_{shift} = \text{jour correspondant au minimum de température.}$

La température du sol à une profondeur infinie est ainsi quasiment égale à la température moyenne toute l'année. Le type 77 de *TRNSYS* (Simple Ground Temperature Model) permet d'avoir la température du sol selon l'équation de Kasuda.

Des mesures de caractéristiques d'échantillons de terres ont été réalisés par Boussaid S (90). Les caractéristiques des échantillons étudiés et les résultats de mesure des propriétés thermophysiques, à l'état normal, sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 4-1- Résultats de l'analyse granulo-sédimentométrique des terres étudiées (90)

Désignation	Couleur	$T_m$ (°C)	e (cm)	$\rho_{normal}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m°C)	a (.10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)
Aouamra	Grise	19.8	4.7	1673	0.806	6.580
Ksar al kebir	Grise	20.5	4.4	1956	0.933	5.600
Al hoceima	Brune	19.9	4.9	1647	0.530	2.886
Larache	Grise	19.5	4	1756	0.753	8.075
Tanger	Rouge brique	21.8	4	1697	0.844	6.299
Tétouan	Grise	20.1	4.5	1879	0.680	3.940

A Marrakech par exemple, les propriétés thermo physiques du sol étudié par Sobhy et al (87) pour définir les effets du couplage sol/bâtiment sur la performance thermique d'une maison sont :

- *Conductivité thermique* : 1,28 W /m. K
- *Densité thermique* : 2000 kg/ m<sup>3</sup>
- *Chaleur spécifique du sol* : 659,8 J/kg. K

Pour ces données et pour des profondeurs du sol de 25 cm, 75 cm et 2 m respectivement, nous retrouvons les résultats suivants, à titre d'exemple, avec en abscisse les heures de l'année (de 0 à 8760) et en ordonnée les températures en °C:

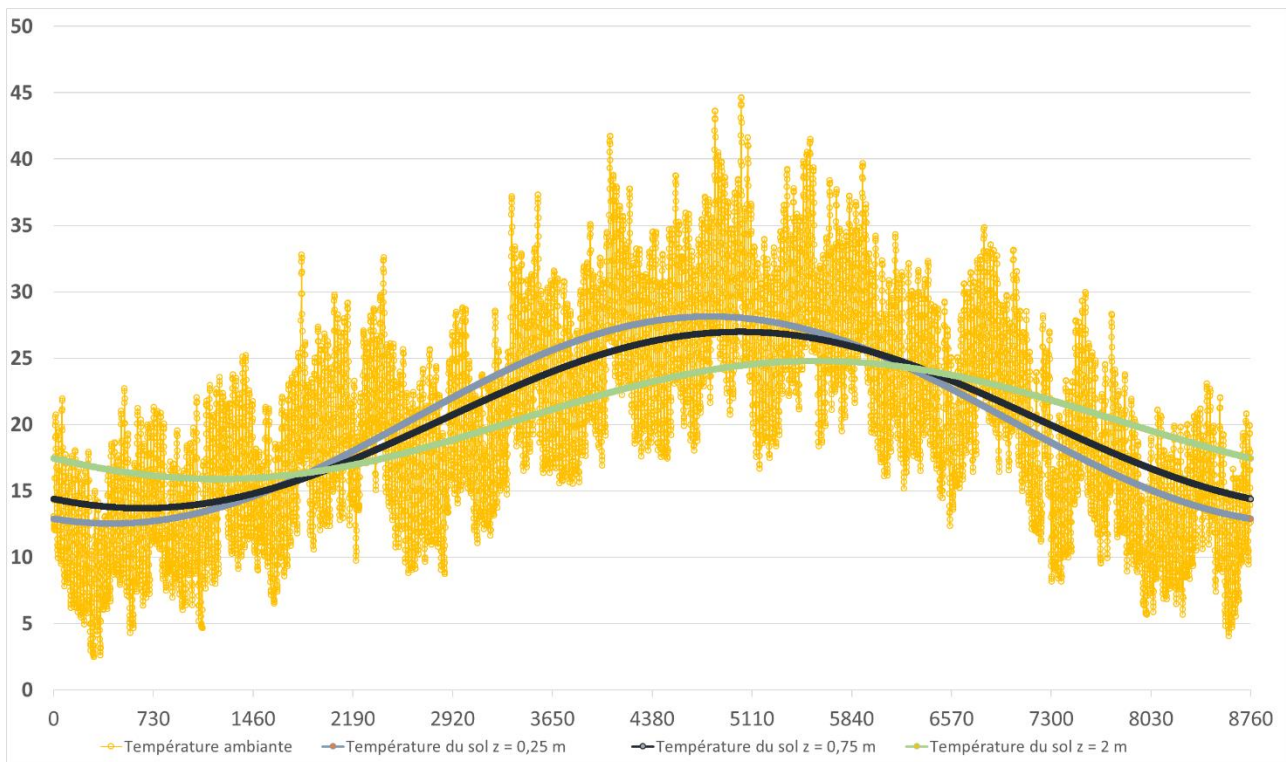


Figure 4-6 - Température du sol & température extérieure

Nous remarquons qu’effectivement le sol présente une température de faible amplitude annuelle que les températures extérieures, et peut permettre de rafraîchir les ambiances intérieures en été.

### 3.2. Modélisation sur TRNSYS

Les principaux types utilisés sur TRNSYS pour notre modélisation sont :

- *Type 77* : pour les échanges avec le sol ;
- *Type 56* : pour modéliser l’enveloppe du bâtiment ;
- *Type 109* : pour lire les données météo ;

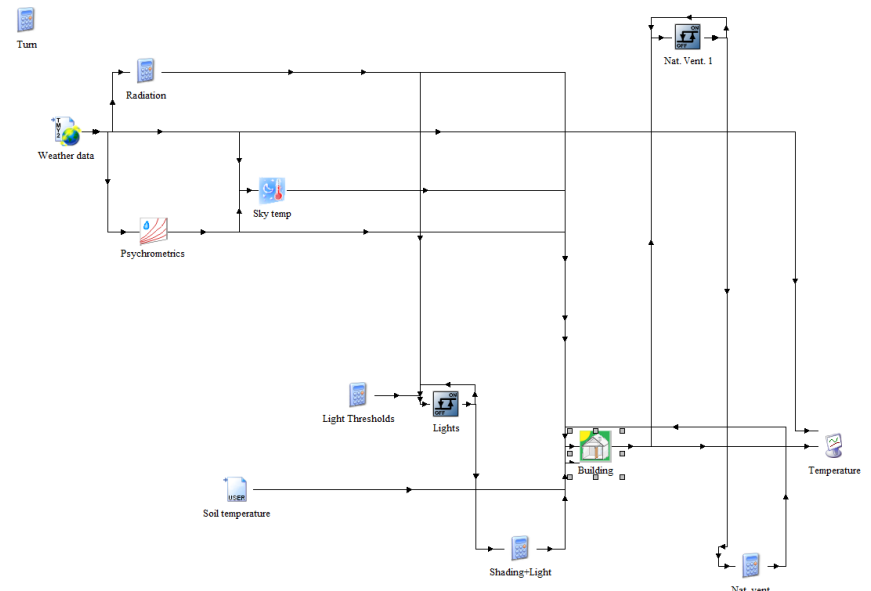


Figure 4-7 - Modélisation sous TRNSYS (88)

Nous étudions dans un premier temps le cas de base sans chauffage ni climatisation.

La modélisation sous TRNSYS est un assemblage des différents modèles proposés (bâtiment, chauffage, climatisation, échange plancher-bas et sol etc.).

### 3.3. Résultats initiaux

#### 3.3.1. Résultats sans chauffage ni climatisation

Nous présentons dans la figure ci-dessous l'évolution de la température opérative du bâtiment, sans chauffage ni climatisation. Les résultats présentés démontrent que les températures intérieures de notre bâtiment suivent les températures ambiantes, et quittent souvent la zone de confort située entre les températures de consignes de chauffage et de climatisation du RTCM (20 et 26°C).

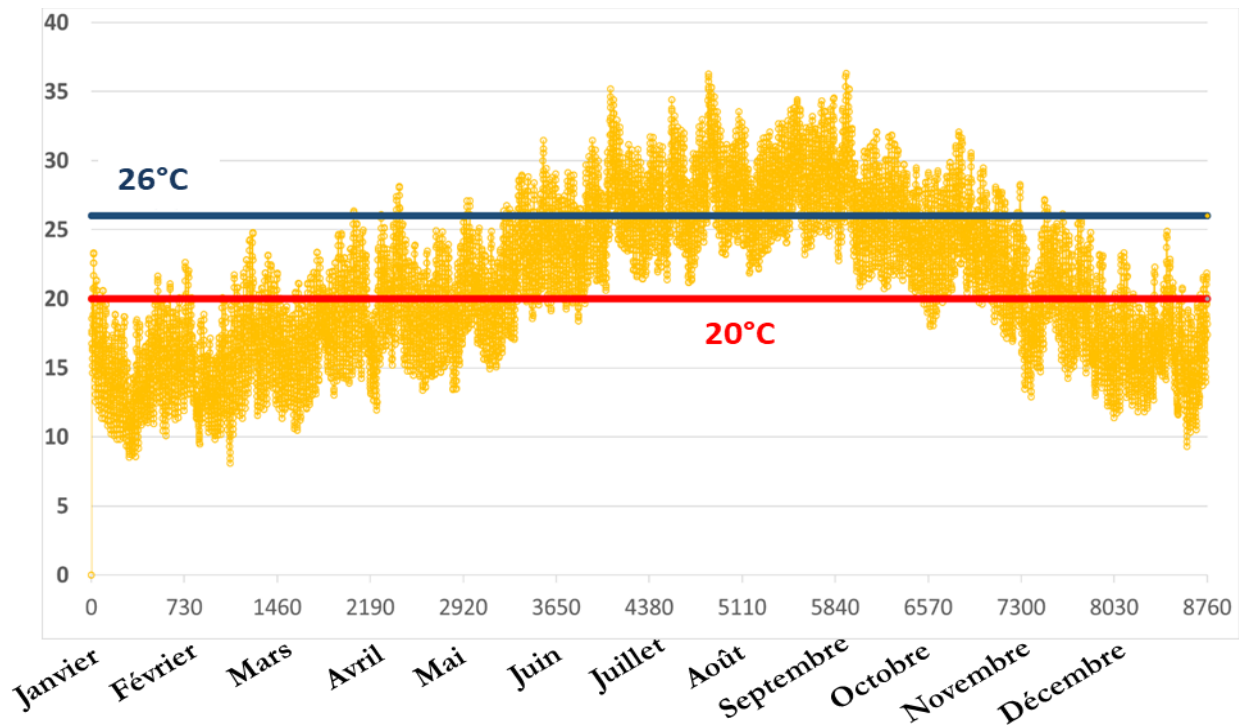


Figure 4-8 - Température opérative du bâtiment

Le bâtiment est globalement à chauffer entre mi-novembre et mi-mai et à climatiser entre mi-mai et mi-novembre approximativement. Ces résultats confirment la méthode des degrés-jours et leurs évolutions à Settat décrites précédemment. Nous remarquons également que les températures intérieures de notre bâtiment modèle sont souvent en dehors de la zone de confort située entre 20°C et 26°C.

#### 3.3.2. Résultats avec chauffage et climatisation

Dans ce paragraphe, nous évaluons les besoins de chauffage et de climatisation nécessaires pour maintenir le confort (températures opératives entre 20 et 26°C). L'axe des abscisses correspond au heures de l'année (de 0 à 8760).

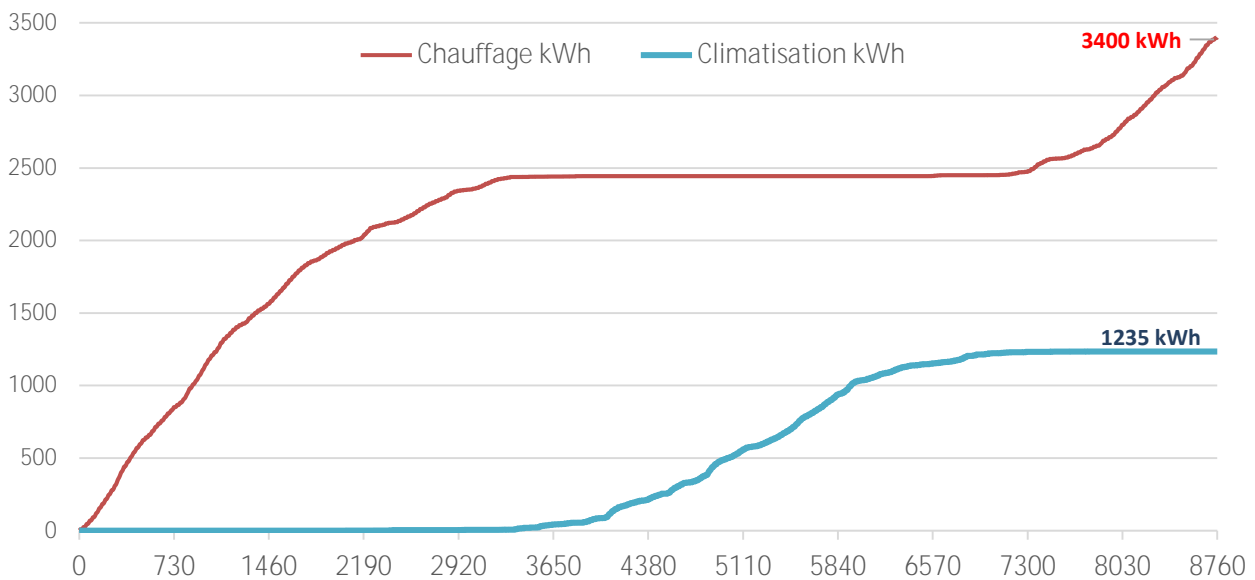


Figure 4-9 - Besoins de chauffage et climatisation en kWh

Nous concluons que le besoin annuel de chauffage est de 3400 kWh et celui de climatisation est de 1235 kWh, ce qui fait un total de 185 kWh/m<sup>2</sup>/an (contre 40 kWh/m<sup>2</sup>/an maximum requis pour être conforme à la réglementation thermique marocaine).

Les caractéristiques du bâtiment doivent être optimisées afin de réduire sa consommation énergétique et d'être conforme à la réglementation thermique marocaine. Dans ce sens, nous présentons dans le paragraphe suivant les outils utilisés dans cette démarche.

## 4. CHOIX DES PARAMETRES D'ENTREE ET DES FONCTIONS A ETUDIER

### 4.1. Paramètres d'entrée (*inputs*)

Dans l'état de l'art, plusieurs études ont traité du choix des paramètres d'entrée à étudier dans le cadre des optimisations à un ou plusieurs objectifs.

Pour établir la réglementation thermique marocaine, Sick (30) a réalisé une analyse paramétrique énergétique sur les paramètres d'enveloppe ci-dessous :

- Isolation des murs (3 épaisseurs d'isolant des murs extérieurs), des toitures (3 épaisseurs d'isolant du plafond) et des planchers bas (3 épaisseurs d'isolant du plancher bas) ;
- Isolation des fenêtres (4 TGBV, 4 coefficients U des fenêtres) ;
- Protection solaire des vitrages et des fenêtres (4 coefficients g des fenêtres) ;
- Orientation du bâtiment (3 orientations du bâtiment).

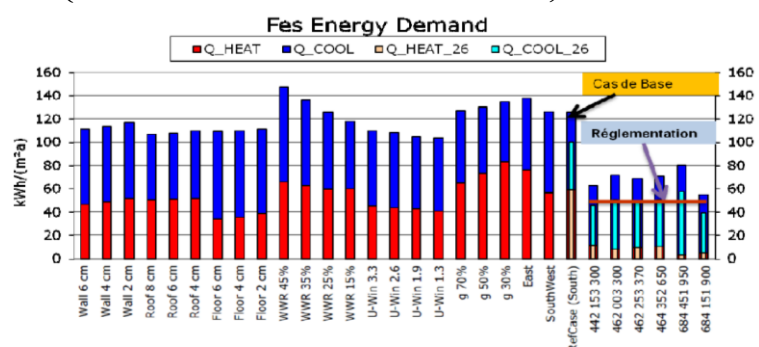


Figure 4-10 - Variantes étudiées lors de l'élaboration du RTCM (30)

P. Heiselberg et al. (91) ont étudié la conséquence de la variation des conductivités thermiques des parois, du type de fenêtres, des protections solaires, de la ventilation et de l'éclairage sur les besoins énergétique d'un bâtiment de bureaux au Danemark. A. Shariah et al. (92) ont étudié l'impact de la variation des coefficients d'absorption des parois sur les consommations énergétiques en Jordanie et ont conclu que l'utilisation des couleurs claires sur la face extérieure des plafonds réduit de façon significative les besoins de chauffage et de climatisation. L. Magnier et al. (93) ont analysé l'effet des paramètres de l'enveloppe (superficies des fenêtres orientées Nord et Sud, masse thermique du bâtiment) et des systèmes (températures de consigne de chauffage, de climatisation et d'humidité relative, débit d'infiltration d'air et des scénarios de ventilation). Les fonctions étudiées (optimisation multiobjectif avec des algorithmes évolutionnaires) étaient le confort thermique, sur la base du PMV ainsi que la consommation d'énergie du bâtiment. Plusieurs auteurs ont également étudié l'effet de l'orientation du bâtiment sur le comportement thermique de l'air intérieur et sur la consommation d'énergie tels que Maya Yeshwanth Pai (94) et al, qui ont décrit l'effet de différentes orientations du bâtiment sur la consommation d'énergie du système de HVAC (chauffage, ventilation et climatisation) pour plusieurs zones en Inde.

Nous préconisons pour notre étude les paramètres suivants, avec une famille relative à l'isolation thermique, une deuxième au choix de peinture, une 3ème à la qualité de la construction (débit d'infiltration), une quatrième à l'usage des protections solaires et été et une dernière au type des vitrages utilisés :

Tableau 4-2 - Paramètres d'entrée

		<i>Continu (C)</i> <i>Discret (D)</i>	<i>Unité</i>	<i>Niveau bas</i>	<i>Niveau haut</i>
$X_0$	<i>Isolation des murs extérieurs</i>	C	Mètre	0,001	0,1
$X_1$	<i>Isolation de la toiture</i>	C	Mètre	0,001	0,1
$X_2$	<i>Isolation du plancher bas</i>	C	Mètre	0,001	0,1
$X_3$	<i>Peinture des murs extérieurs</i>	C	-	0,1	0,9
$X_4$	<i>Peinture de la toiture</i>	C	-	0,1	0,9
$X_5$	<i>Débit d'infiltration</i>	C	-	0,3	1,15
$X_6$	<i>Protection solaire façade Sud</i>	C	-	0	1
$X_7$	<i>Protection solaire façade Est</i>	C	-	0	1
$X_8$	<i>Protection solaire façade Ouest</i>	C	-	0	1
$X_9$	<i>Type du vitrage Sud</i>	D	-	0 : Simple vitrage	
$X_{10}$	<i>Type du vitrage Nord</i>	D	-	1 : Double vitrage	
$X_{11}$	<i>Type du vitrage Est</i>	D	-	2 : Triple vitrage	
$X_{12}$	<i>Type du vitrage Ouest</i>	D	-	3 : Double vitrage faible émissivité	
				4 : Double vitrage faible émissivité Argon	
				5 : Triple vitrage à contrôle solaire	

L'utilisation des protections solaires (en pourcentage) est applicable de mi-mai à mi-octobre, en suivant les préconisations de l'étude des degrés-jours réalisée précédemment. Les protections solaires ne sont pas utilisées en dehors de cette période (valeur 0).

Le taux d'infiltration d'air considéré dans l'élaboration du *RTCM* est de 30 m<sup>3</sup>/heure et par personne. Dans notre cas, ce ratio donne 0,4 vol/h (le volume du bâtiment étant égal à 75 m<sup>3</sup>).

La norme NF EN 12831 propose dans son cas de référence, pour un bâtiment avec un niveau médiocre d'étanchéité à l'air, la valeur de 1,15 vol/h sous une différence de pression de 4 Pa. Nous proposons ainsi d'étudier ce paramètre entre 0,3 (bonne étanchéité à l'air) et 1,15 vol/h (étanchéité à l'air médiocre).

Les coefficients d'absorption peuvent être définis selon les couleurs des peintures :

Les combinaisons qui peuvent être faites de ces paramètres d'entrée sont infinies.

Si on considère uniquement 5 valeurs de paramètres à étudier, on a  $5^{13} = 1,2 \times 10^9$  combinaison à étudier !

Les méthodologies de l'outil SAMOT vont nous permettre de bien comprendre le modèle, et d'optimiser ses performances.

Nous réalisons dans un premier lieu, ci-dessous, une optimisation à deux critères, pour le scénario actuel :

Minimiser :

$$\begin{cases} \text{Energie de chauffage en kWh/m}^2/\text{an} \\ \text{Energie de climatisation en kWh/m}^2/\text{an} \end{cases}$$

Les résultats sont donnés ci-dessous. Les solutions qui sont conformes à la contrainte réglementaire (Energie totale < 40 kWh/m<sup>2</sup>/an) sont donnés en bleu foncé.

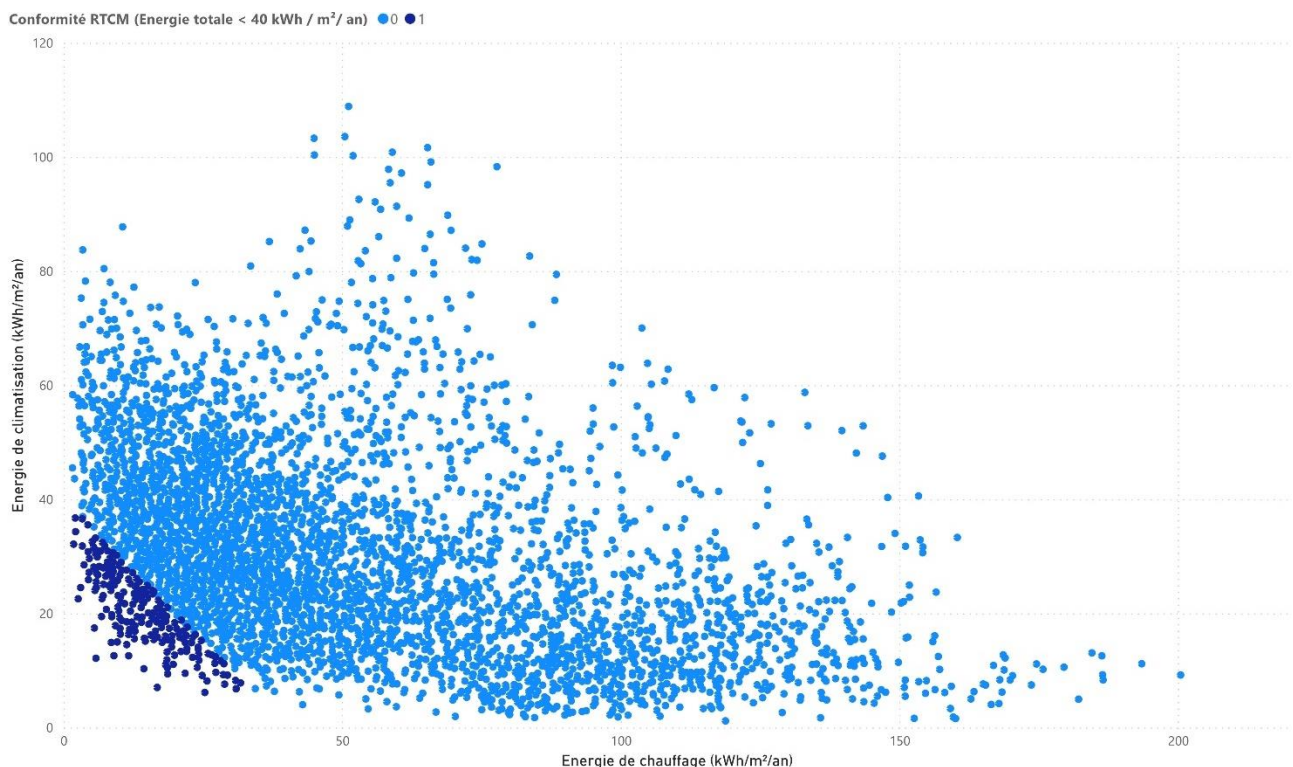


Figure 4-11 - Optimisation à deux critères



Dans ces combinaisons, la solution qui maximise l'énergie de chauffage est (200 kWh/m<sup>2</sup>/an de chauffage et 9 de climatisation) :

- *Pas d'isolation des parois opaques*
- *Couleur claire de la toiture (0,1)*
- *Couleur moyennement foncée des murs extérieurs (0,66)*
- *Débit d'infiltration maximal (1,15)*
- *Protections solaires sud et ouest à 66% et est à 33%*
- *Simple vitrage pour les façades Nord et Ouest*
- *Double vitrage faible émissivité pour la façade sud et triple à faible émissivité pour la façade Est*

La solution qui maximise l'énergie de climatisation est (51 kWh/m<sup>2</sup>/an de chauffage et 109 de climatisation) :

- *Isolation maximale des murs extérieurs, pas d'isolation de la toiture et bonne isolation du plancher bas*
- *Couleur moyennement foncée des murs extérieurs (0,6) et foncée de la toiture (0,9)*
- *Pas d'utilisation des protections solaires*
- *Simple vitrage pour les façades Est et Ouest*
- *Triple vitrage à faible émissivité pour la façade nord et triple vitrage pour la façade sud*

## **4.2. Fonctions à étudier (outputs)**

Au vu des solutions du problème bi-objectif précédent, les deux objectifs climatisation et chauffage sont assez contradictoire et les satisfaire en même temps est compliqué. Nous allons ainsi, dans la suite du chapitre, optimiser leur somme qu'on désignera par « Energie totale ».

Nous proposons les fonctions suivantes à étudier, pour satisfaire les exigences énergétiques, économiques et environnementales :

$$f_1(X) = \text{Energie totale actuelle en kWh/m}^2/\text{an}$$

$$f_2(X) = \text{Energie totale en 2050 en kWh/m}^2/\text{an}$$

$$f_3(X) = \text{Energie totale en 2100 en kWh/m}^2/\text{an}$$

$$f_4(X) = \text{Surcoût d'investissement en dirhams}$$

$$f_5(X) = \text{Energie grise en kWh}$$

### **4.2.1. Energie totale**

L'énergie totale correspond à la somme de l'énergie de chauffage et de climatisation requises pour le bâtiment, avec des températures de consigne de 20°C (chauffage) et 26° (climatisation). Cette énergie est calculée via le logiciel TRNSYS. Le calcul sera fait dans un scénario actuel, à l'horizon 2050 et à l'horizon 2100 pour les deux scénarios A2 et B1. Ce critère est un critère *énergétique*.

## 4.2.2. Surcoûts d'investissement

Le surcoût d'investissement  $C_{inv}$  correspond à la somme des coûts associés aux différents composants mis en œuvre. Cet indicateur permet au propriétaire ou à l'investisseur d'avoir un premier constat sur les capitaux engagés. Nous étudions le surcoût induit par la variation des paramètres d'entrée (isolation thermique et type des fenêtres).

Le guide de l'isolation thermique de l'ADEREE (14), présente une estimation du prix moyen au  $m^2$  de l'isolation thermique, comme une moyenne pondérée de produits sur la base d'une part de marché estimée en fonction de ce qui se passe dans les pays de la Méditerranée. Il est ainsi considéré que :

- Pour les parois verticales (murs, cloisons...) :

$$\text{Prix (Dh/m}^2\text{)} = 27,32 R + 20,04$$

- Pour les parois horizontales (planchers, toitures, ...) avec charge :

$$\text{Prix (Dh/m}^2\text{)} = 41,35 R + 20,38$$

- Pour les parois horizontales (planchers, toitures, ...) sans charge :

$$\text{Prix (Dh/m}^2\text{)} = 17,02 R + 19,45$$

Avec R la résistance thermique de l'isolant à utiliser. L'estimation moyenne du prix de l'isolation selon cette étude est de  $65,66 \text{ Dh/m}^2$ .

Le générateur des prix de construction au Maroc conçu par CYPE Ingenieros (95) donne, entre autres, les prix des vitrages au  $m^2$  par type. Pour les vitrages de notre étude, le prix par  $m^2$  des différentes solutions étudiées est de :

Tableau 4-3 - Prix et propriétés des vitrages

Type du vitrage	Epaisseur des couches en mm	U-value (W/m <sup>2</sup> K)	Facteur solaire	Prix au m <sup>2</sup> (Dh)
Simple vitrage	2,5	5,74	0,87	283,8
Double vitrage	2,5/12,7/2,5	2,95	0,777	385,86
Triple vitrage	2,5/12,7/2,5/12,7/2,5	2	0,7	578,79
Double vitrage faible émissivité	3/12,7/2,5	1,76	0,597	1132,74
Double vitrage faible émissivité Argon	3/12,7/2,5	1,43	0,596	1209
Triple vitrage contrôle solaire	6/12/4/12/4	0,72	0,13	1813,5

## 4.2.3. Energie grise

Afin de construire des bâtiments performants avec un usage raisonné de l'énergie, il est indispensable d'identifier les impacts environnementaux des différents choix de conception. Lors de la construction ou la rénovation d'un bâtiment et également pendant tout son cycle de vie, plusieurs conséquences sur l'environnement peuvent être prévus et optimisés même pour les décennies suivant sa conception.

Deux bases de données majeures sont disponibles gratuitement pour l'analyse de cycle de vie de la construction des bâtiments ; Il s'agit dans premièrement de la base *INIES* (96), base nationale française de référence des caractéristiques environnementales et sanitaires pour le bâtiment en France et deuxièmement de la base *KBOB* (97), base de données suisse. Cette dernière contient des données d'écobilans relatives aux matériaux de construction, aux installations techniques du bâtiment, à la fourniture d'énergie, à l'acheminement et aux processus d'élimination etc.

Dans le cadre de ce travail, nous allons utiliser les données de la base *KBOB* pour évaluer l'énergie grise des différentes solutions étudiées pour notre bâtiment modèle.

L'énergie grise *non renouvelable* est requise pour produire initialement un bâtiment et le maintenir pendant sa durée de vie utile. Il s'agit de l'énergie utilisée pour acquérir, traiter et fabriquer les matériaux de construction, y compris tout transport lié à ces activités.

L'énergie grise en kWh correspondant aux différents paramètres étudiés est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-4- Energie grise des solutions étudiées

Composant	Energie grise
Simple vitrage	101 kWh/ m <sup>2</sup>
Double vitrage	199 kWh/ m <sup>2</sup>
Triple vitrage	261 kWh/ m <sup>2</sup>
Double vitrage faible émissivité	335 kWh/ m <sup>2</sup>
Double vitrage faible émissivité Argon	390 kWh/ m <sup>2</sup>
Triple vitrage contrôle solaire	484 kWh/ m <sup>2</sup>
Laine de verre	250 kWh/ m <sup>3</sup>
Laine de roche	150 kWh/ m <sup>3</sup>

Nous allons par la suite étudier le comportement de notre bâtiment à la suite de la variation des 13 paramètres d'entrée. Nous commençons par réaliser des analyses de sensibilité des fonctions énergétiques étudiées.

## 5. ANALYSE DE SENSIBILITE

### 5.1. Nombre de combinaison à choisir

L'une des principales difficultés dans l'exécution des analyses de sensibilité est le choix du nombre de simulations du modèle à réaliser, avant de réaliser le calcul des indices de sensibilité. Looss (48) a réalisé une classification des méthodes d'analyse de sensibilité selon le nombre d'évaluations du modèle.

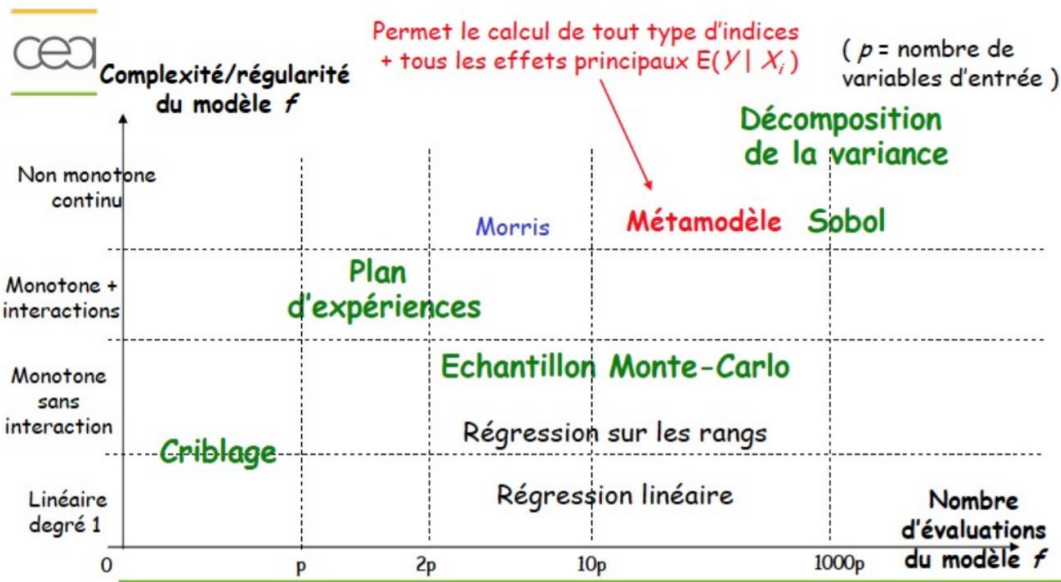


Figure 4-12 - Comparaison des nombres de simulations par méthode

Il en découle que la méthode de Sobol nécessite au minimum un nombre important d'évaluations (à partir de  $1000p$  avec  $p$  le nombre de paramètres). Morris nécessite moins d'évaluations. Nous allons comparer les méthodes d'analyse de sensibilité ci-dessous, avec étude de l'impact du nombre de simulations choisi sur les résultats :

- Méthode de Sobol
- Méthode de Morris
- Delta Moment-Independent Measure

L'exercice sera fait sur l'énergie totale à l'horizon actuelle. Les différentes méthodologies donnent des coefficients d'erreur sur les indices de sensibilité. Nous allons étudier ces derniers par nombre de simulation et par méthode.

### 5.1.1. Méthode de Sobol

La méthode de Sobol propose d'étudier soit l'indice d'ordre 1, qui ne prend pas en compte l'effet des interactions entre les paramètres, ou l'indice total qui est calculé comme ci-dessous :

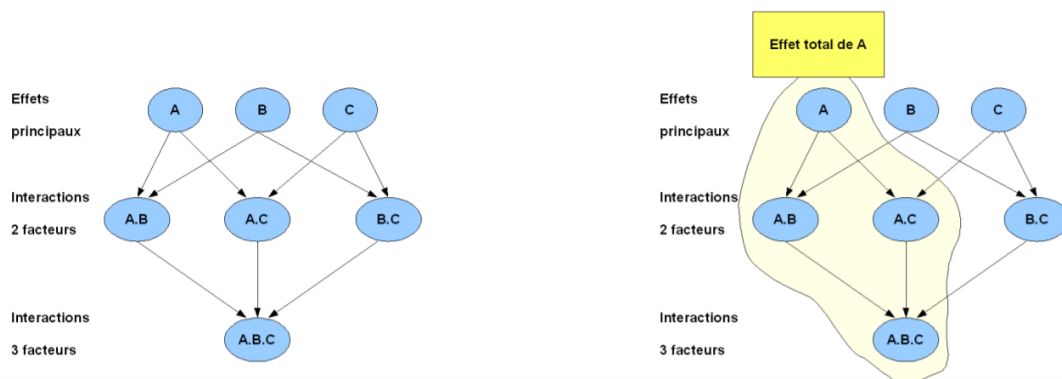


Figure 4-13 - Indices de sensibilité totaux de Sobol (calcul de l'effet total)

Pour la première analyse avec la méthode de Sobol, la matrice d'échantillonnage de Sobol a un nombre de ligne égal à  $N * (D + 2)$ , avec  $D$  le nombre de paramètres et  $N$  le nombre de simulations choisi.

Nous allons étudier les erreurs sur les indices totaux, en fonction du nombre de simulation ci-dessous :

- $N = \text{de } 10 \text{ à } 100, \text{ avec un pas de } 10$
- $N \text{ de } 100 \text{ à } 2000, \text{ avec un pas de } 100$

Les résultats des coefficients d'erreur par paramètre (ST\_Conf) et par nombre de simulation sont récapitulés dans le graphique ci-dessous ;

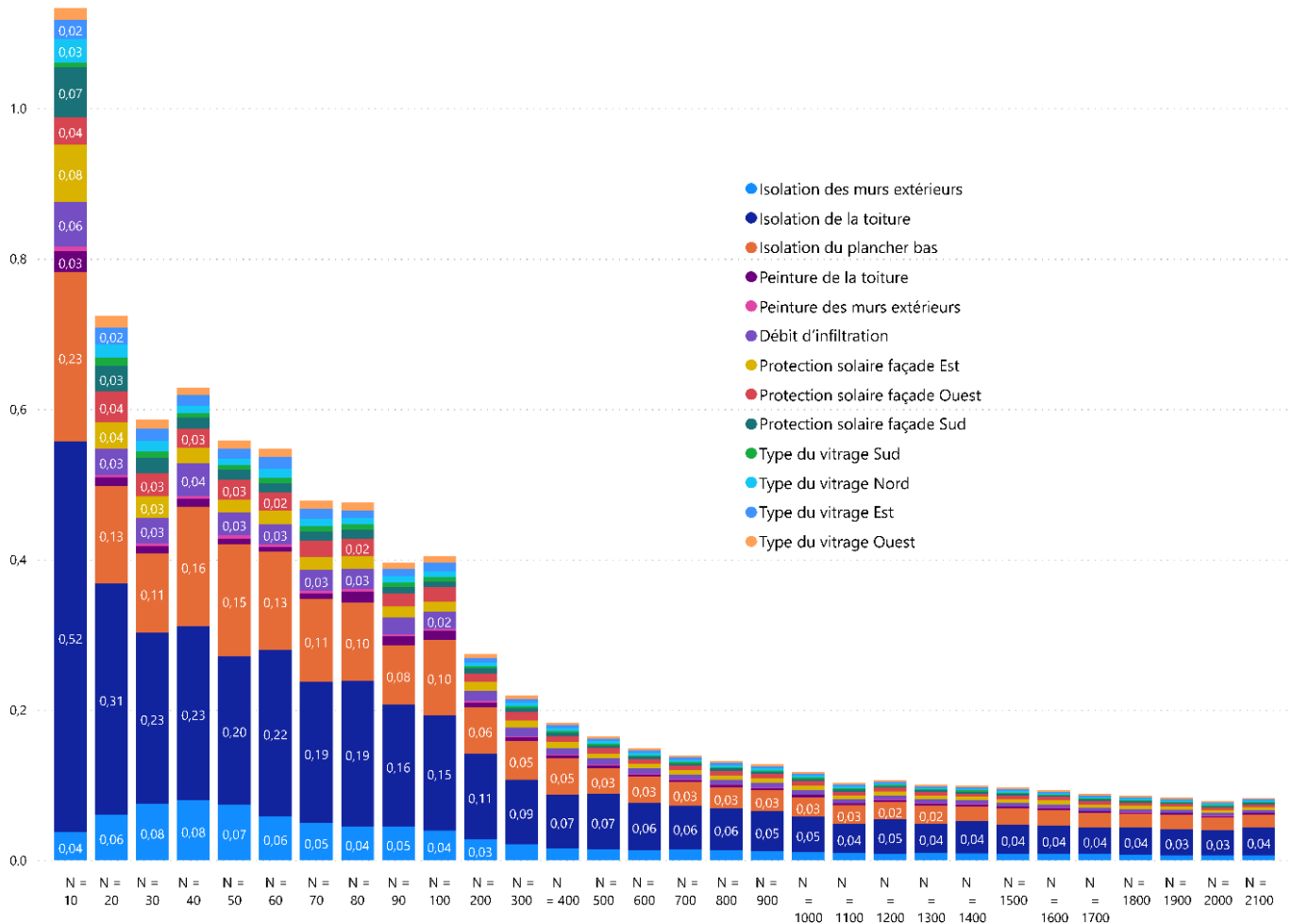


Figure 4-14 - Coefficient d'erreur sur le calcul des indices totaux, par paramètre

Nous remarquons que les indices ST\_Conf deviennent stables à partir de  $N = 1000$ , et ont des valeurs acceptables à partir de  $N = 500$ . Il est ainsi judicieux de choisir un  $N > 500$ , ce qui correspond dans notre cas à un nombre de simulations égal à  $15 \times 500 = 7500$  simulations.

Nous présentons dans la figure 4-15 les résultats pour  $N = 10$ ,  $N = 100$ ,  $N = 500$ ,  $N = 1000$  et  $N = 2000$ .

La hiérarchisation des paramètres devient également stable à partir de  $N = 500$ . Cependant, à partir de  $N = 100$  on obtient une idée précise sur les paramètres les plus influents.

La méthode de Sobol est ainsi efficace mais très onéreuse en temps de calcul.

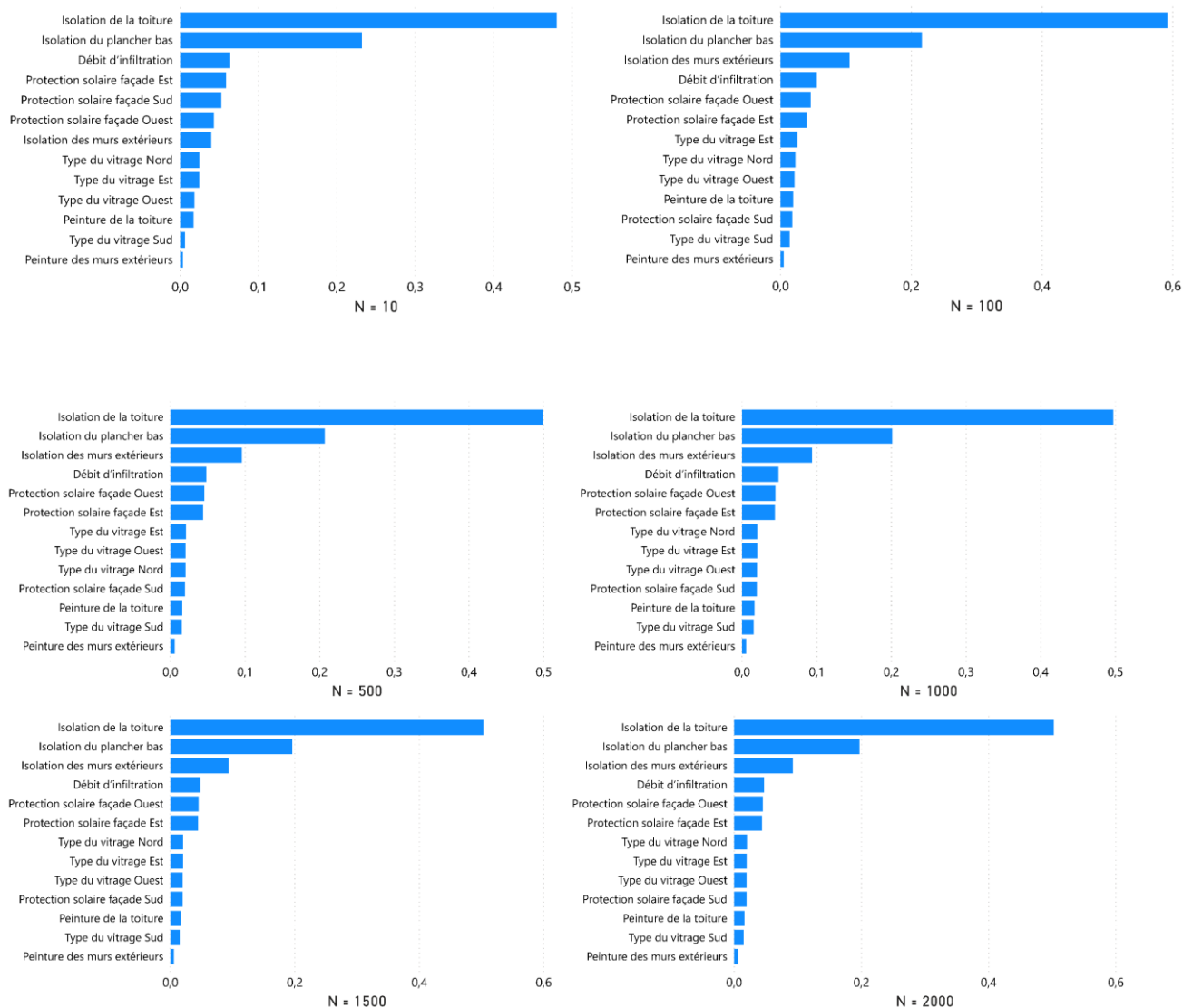


Figure 4-15 - Résultats d'hierarchisation des paramètres, N = 10, N = 100, N = 500, N = 1000 et N = 2000

### 5.1.2. Méthode de Morris

Pour la méthode de Morris, le nombre de ligne de la matrice d'échantillonnage est de  $(D + 1) \times N$ , avec D est le nombre de paramètres et N le nombre de simulations choisi. Il est possible de définir le nombre de trajectoires (le nombre de valeurs possibles par paramètre d'entrée) dans la méthode de Morris. Un nombre de 4 trajectoires est donné par défaut. Nous allons étudier l'impact du nombre de simulations sur le coefficient  $\mu_{Star\_Conf}$ , les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous pour un échantillonnage de Morris de 100 à 900 (avec pas de 100) et de 10 à 100 (avec un pas de 10).

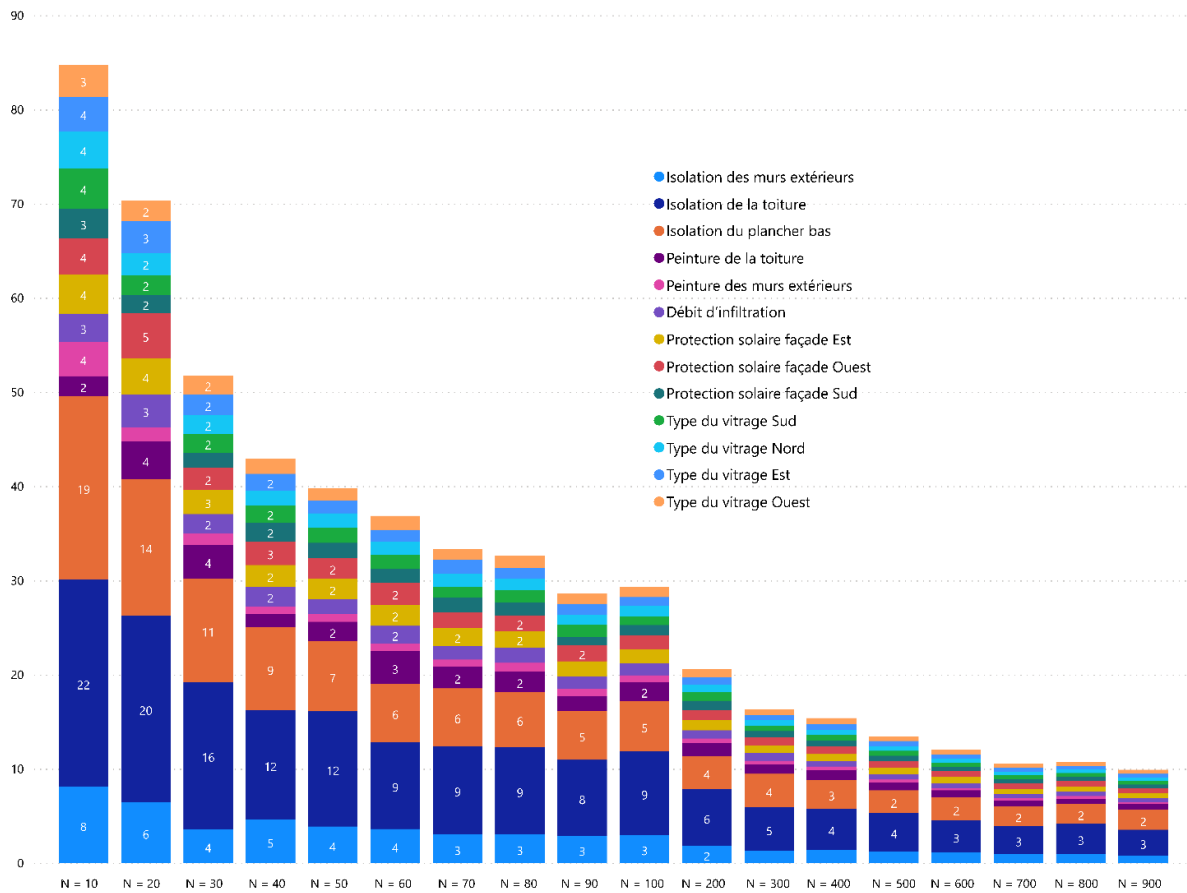
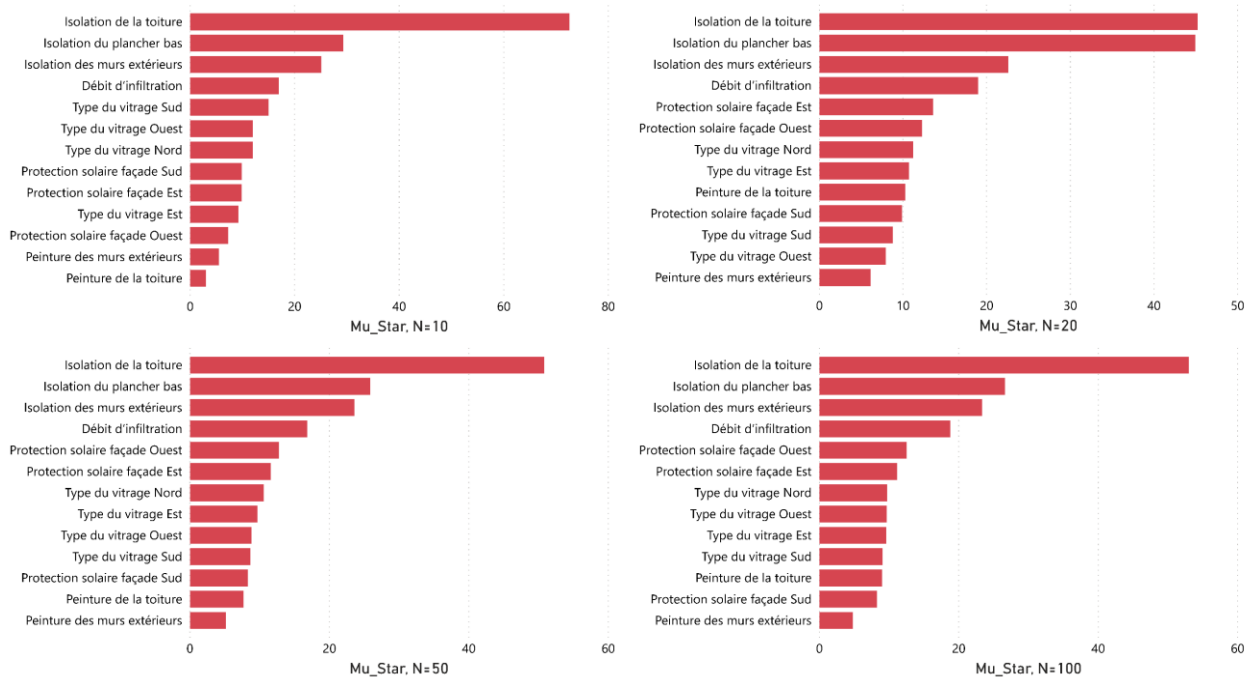


Figure 4-16 - Coefficient d'erreur sur le calcul de l'indice Mu\_Star, par paramètre

Nous remarquons que l'indice Mu\_Star se stabilise à partir d'un nombre de simulation  $N > 300$ , et nous obtenons des bonnes valeurs à partir de  $N = 200$ .

Les résultats donnent, en exploitant l'indice Mu\_Star :



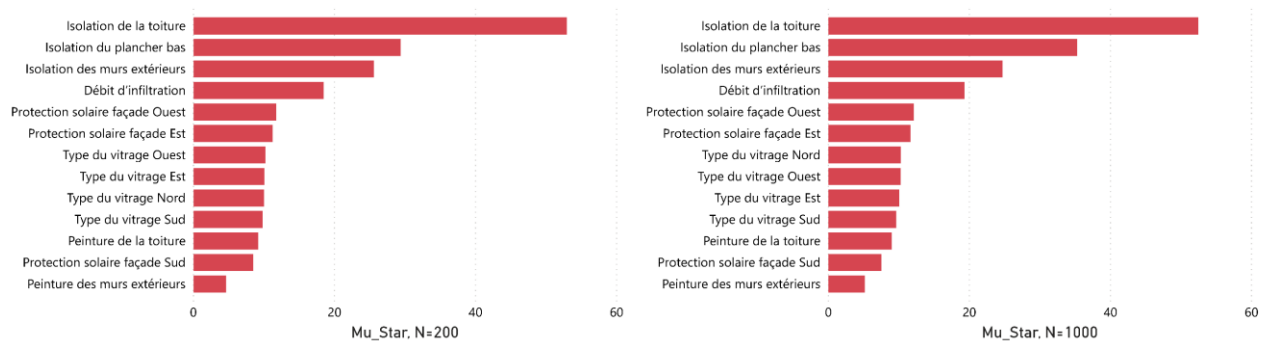


Figure 4-17 - Hiérarchisation des paramètres pour N = 10, 20, 50, 100, 200 et 1000

Nous remarquons qu'avec un jeu réduit de combinaisons des paramètres d'entrée ( $N = 10$ ), la méthode de Morris permet d'avoir une bonne idée sur les 4 paramètres plus influents du modèle. Nous obtenons une bonne hiérarchisation des paramètres d'entrée (similaire aux indices du premier ordre de Sobol, car les interactions entre les paramètres ne sont pas étudiées dans la méthode de Morris).

Outre ces données, le signe de l'indice Mu, donné par la méthode de Morris, permet d'avoir une idée sur l'impact des paramètres sur la sortie (si l'augmentation de la valeur du paramètre fait augmenter la sortie ou inversement).

### 5.1.3. Méthode Delta Moment-Independent Measure

Nous allons étudier ci-dessous la méthode Delta Moment. Cette méthode repose sur un échantillonnage avec la méthode LHS.

Nous étudions les coefficients d'erreur sur l'indice de sensibilité  $S1$  obtenu par la méthode. Les résultats sont donnés ci-dessous pour des échantillons d'un total de 100 à 1900 simulations, avec un pas de 100.

Nous obtenons des indices d'erreurs qui se stabilisent à partir de  $N = 1000$  simulations.

Nous remarquons que la méthode, dès un nombre de simulations égal à 500, permet d'avoir une bonne hiérarchisation des paramètres les plus influents sur la sortie.

Cet exercice nous a permis de déduire que nous obtenons les mêmes résultats d'hiérarchisation des paramètres d'entrée sur les besoins énergétiques actuels avec les différentes méthodologies.

Les différentes méthodologies d'analyse de sensibilité sont très pertinentes pour analyser les modèles étudiés, mais compte tenu de leur complexité et du nombre important des paramètres des bâtiments ou des systèmes à étudier, le choix de la méthode dépendrait du nombre de simulation à réaliser.



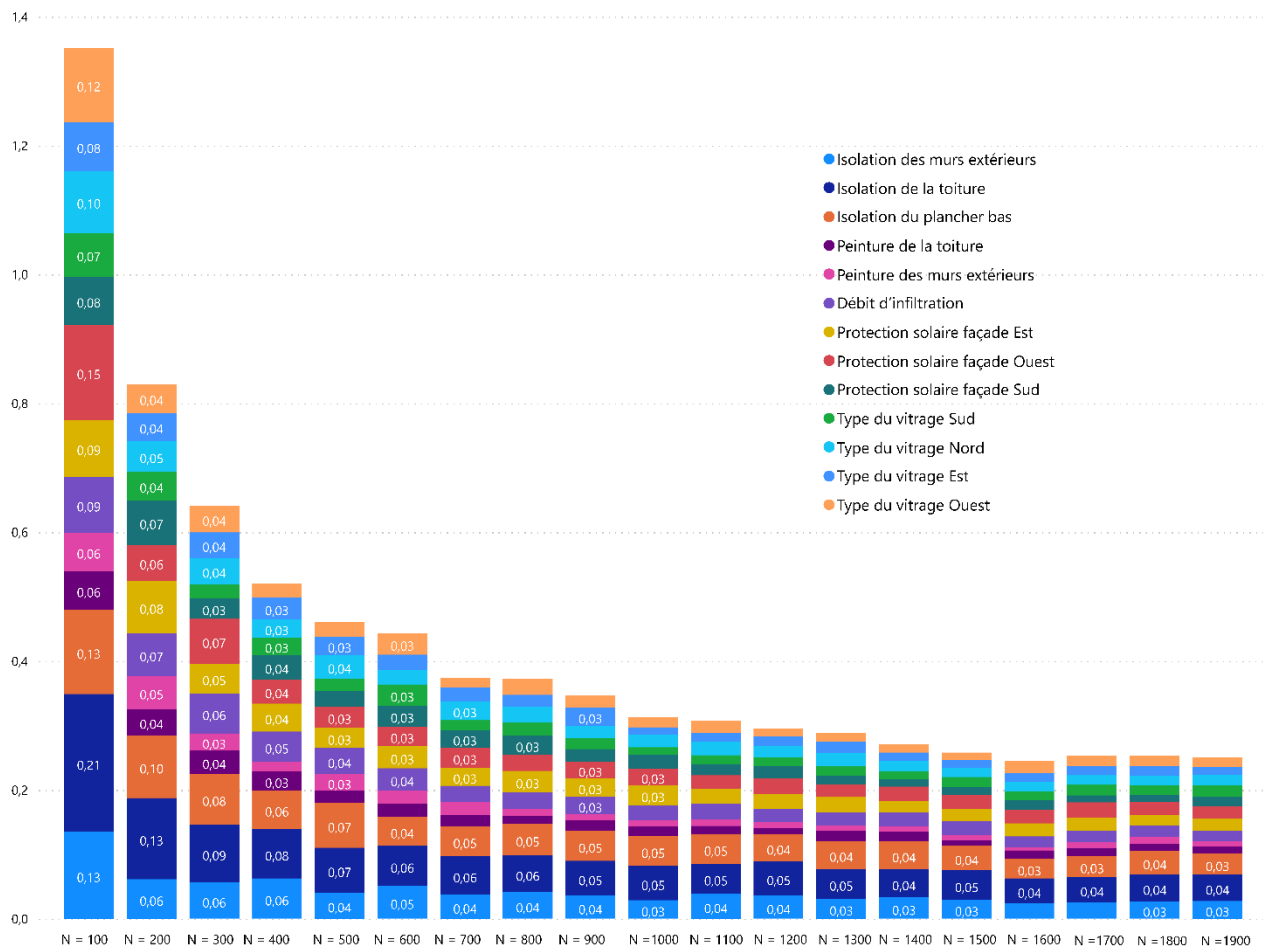


Figure 4-18 - Indices d'erreur sur l'indice S1

## 5.2. Analyse de sensibilité des besoins de chauffage et de climatisation

Nous réalisons dans ce paragraphe une première application de la méthode de Morris sur les besoins de chauffage et de climatisation dans le contexte météorologique actuel.

Le signe de l'indice « Mu » détermine l'effet du paramètre sur la sortie. En effet, lorsque le signe de l'indice est positif, l'augmentation de la valeur du paramètre fait augmenter les besoins énergétiques, et réciproquement.

Les résultats sont :

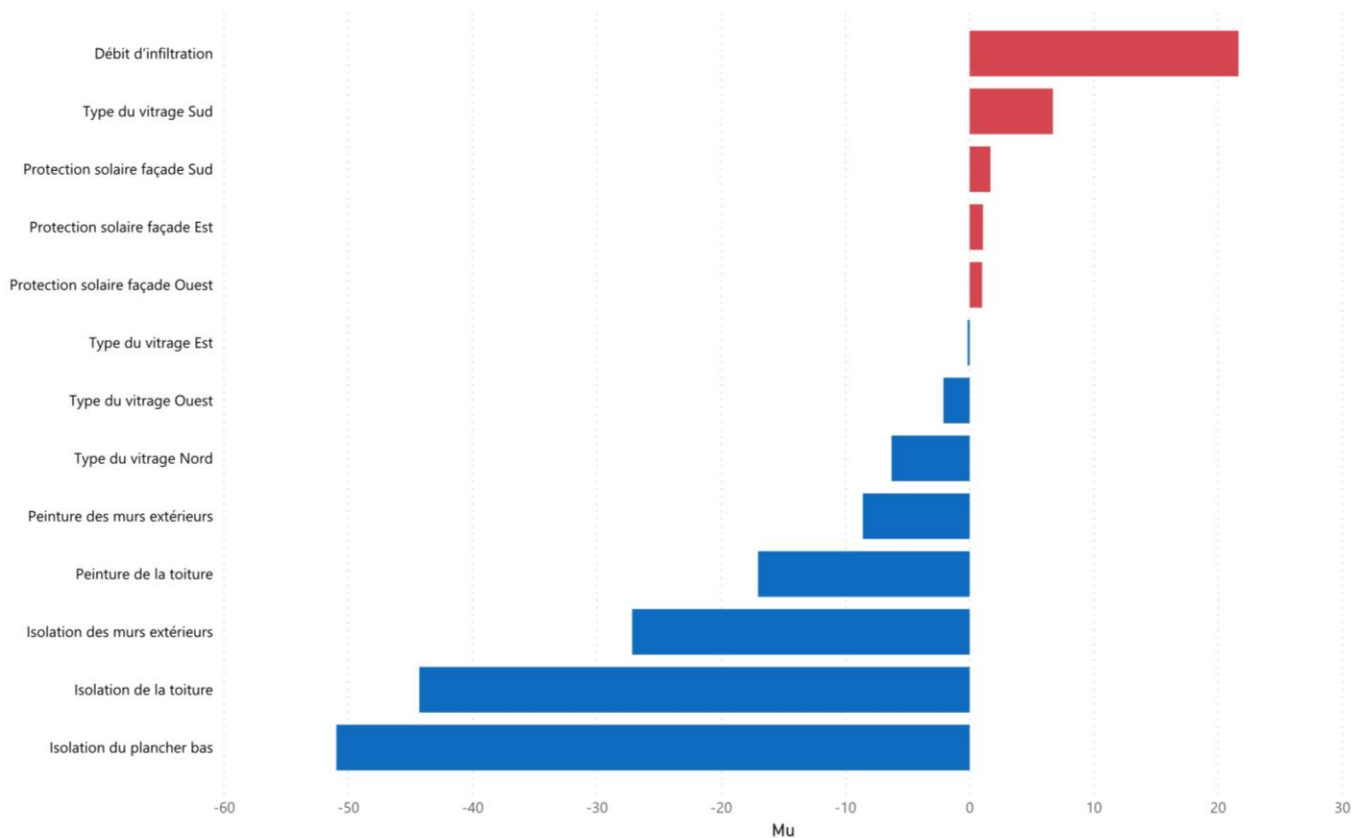


Figure 4-19 - Indices Mu pour les besoins de chauffage

Nous déduisons que l'augmentation des valeurs de l'isolation thermique et de l'absorptivité des parois opaques, ainsi que l'amélioration du vitrage des façades Est, Ouest et Nord permet de réduire les besoins de chauffage de notre bâtiment. A contrario, l'utilisation des protections solaires, l'augmentation du débit d'infiltration (mauvaise étanchéité à l'air) et l'amélioration de la qualité du vitrage sud font augmenter les besoins de chauffage.

L'utilisation du vitrage sud permet, en effet, d'apporter de la chaleur en hiver au bâtiment, et de baisser ses besoins énergétiques. Cette façade est exposée toute la journée au soleil. Il faut ainsi utiliser des vitrages moins performants pour cette façade afin de réduire les besoins de chauffage.

Nous remarquons que les paramètres les plus importants sont les trois paramètres de l'isolation thermique.

Parmi les types de vitrage, les vitrages à surveiller sont le vitrage Nord (car cette façade est déperditive) et le vitrage sud comme expliqué précédemment.

Pour les besoins de climatisation, les résultats sont donnés ci-dessous :

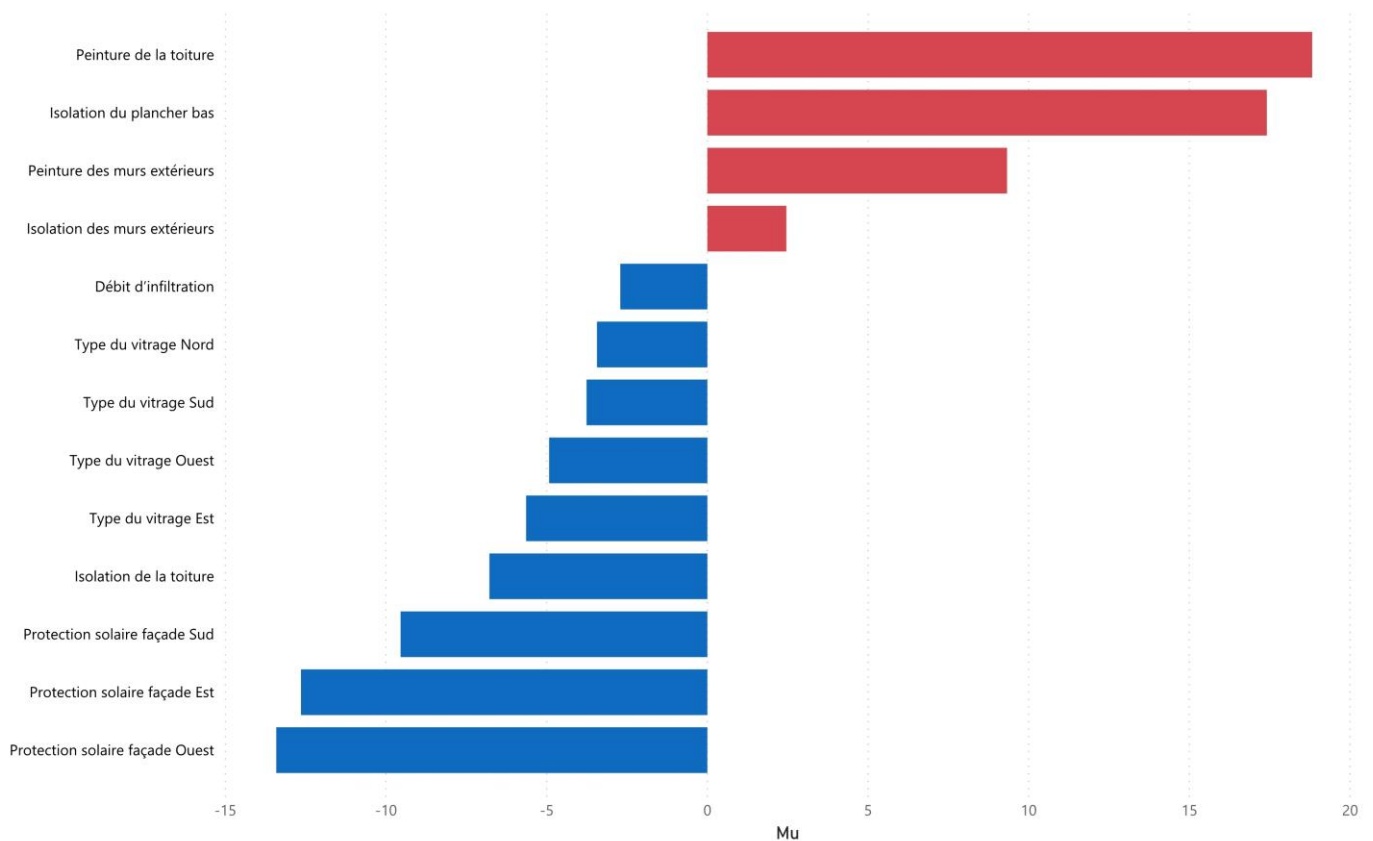


Figure 4-20 - Indices Mu pour les besoins de climatisation

Nous remarquons que l'impact des paramètres est différent de celui vis-à-vis de l'énergie de chauffage, voire contradictoire dans certain cas. Pour l'énergie de climatisation, les paramètres à surveiller sont la peinture de la toiture et des murs extérieurs, l'isolation du plancher bas et des murs extérieurs. L'augmentation de la valeur de ces paramètres induit à une augmentation des besoins de climatisation.

Les protections solaires, notamment celles des façades ouest (la façade exposée dans l'après-midi où les températures extérieures sont les plus élevées), est et sud sont primordiales pour avoir un bon confort estival.

Pour bien comprendre la différence d'impact des vitrages des différentes façades de notre bâtiment, nous présentons ci-dessous la part du rayonnement, en  $W/m^2$ , reçue par chacune d'elles, par heure et par jour dans la figure suivante. Nous observons que la façade nord reçoit très peu de rayonnement toute l'année, les façades est et ouest reçoivent du rayonnement toute l'année pendant le matin et l'après-midi respectivement, et la façade sud reçoit bien plus de rayonnement en hiver et en automne qu'en printemps / été, ce qui confirme l'intérêt de cette façade en période hivernale pour apporter de la chaleur au bâtiment.

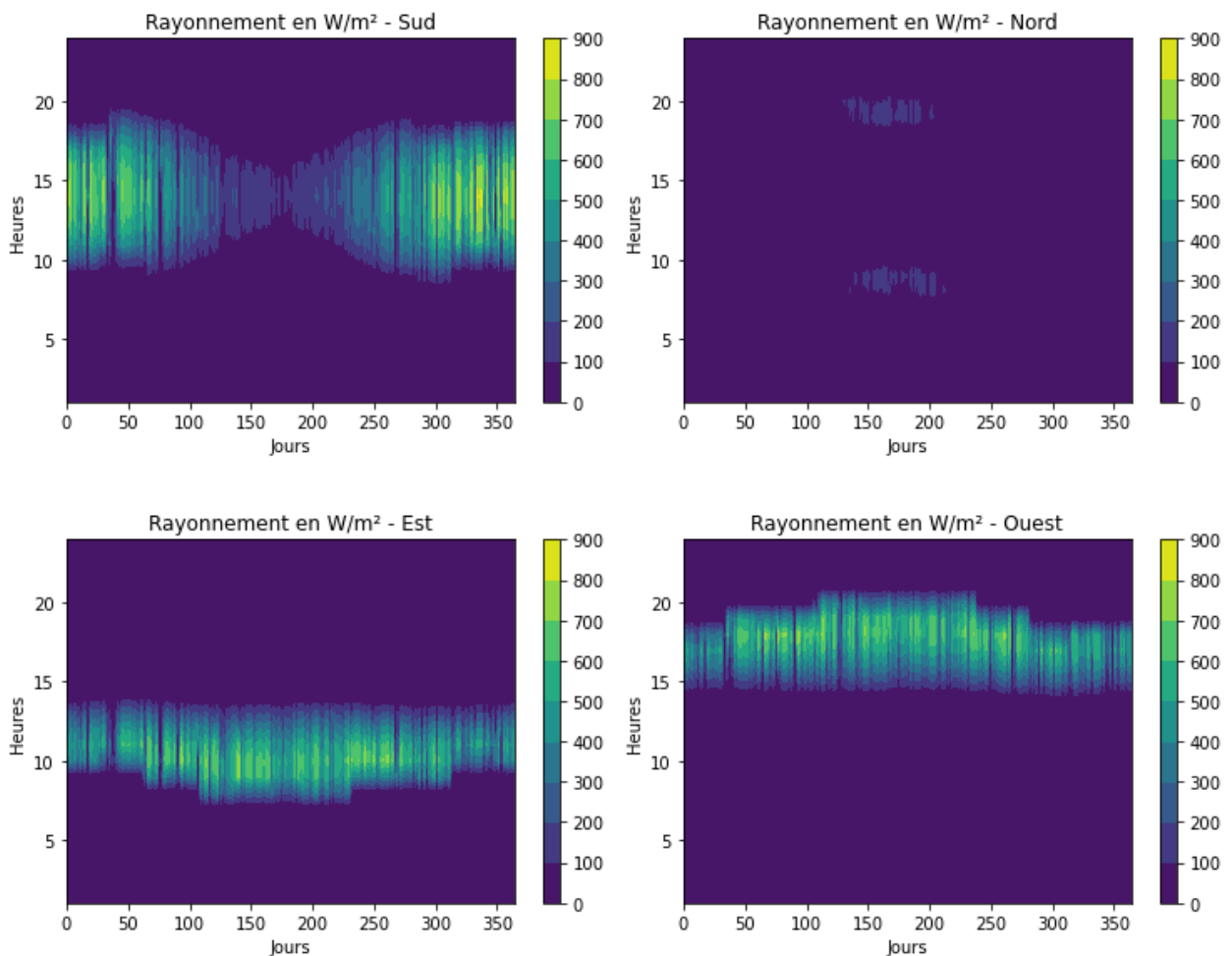


Figure 4-21- Rayonnement en W/m<sup>2</sup> - Façades Nord, Sud, Est et Ouest

L'isolation de la toiture et essentielle, et l'augmentation de la qualité de tous les vitrages induit à une baisse des besoins de climatisation. Le débit d'infiltration fait également baisser les besoins de climatisation.

Nous remarquons qu'ainsi, comme énoncé dans l'optimisation des deux critères (chauffage et climatisation) traitée précédemment, ces deux critères sont contradictoires et que pour satisfaire l'un d'eux, on risque de détériorer l'autre.

La méthode de Morris s'avère très pertinente car permet d'avoir des indices Mu avec un nombre limité d'itérations. Dans la suite, nous allons calculer les indices de sensibilité pour les fonctions des énergies totales  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  selon les deux scénarios B1 et A2, en utilisant la méthode d'analyse de sensibilité globale Sobol (52).

### 5.3. Analyse de sensibilité pour les scénarios B1 et A2

Nous réalisons ci-dessous les analyses de sensibilité par la méthode de Sobol pour les fonctions énergétiques selon les scénarios A2 et B1.

### 5.3.1. Scénario B1 :

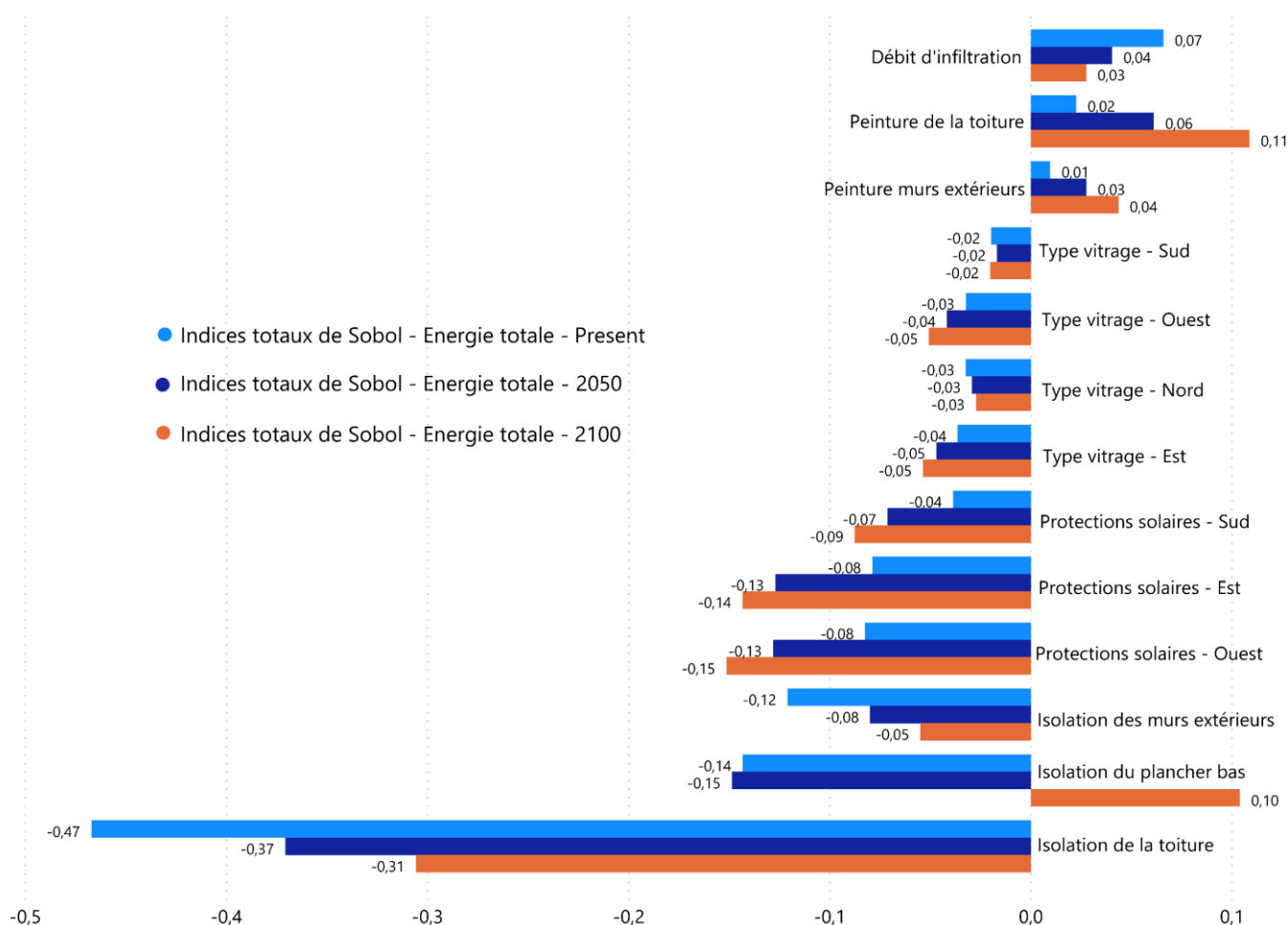


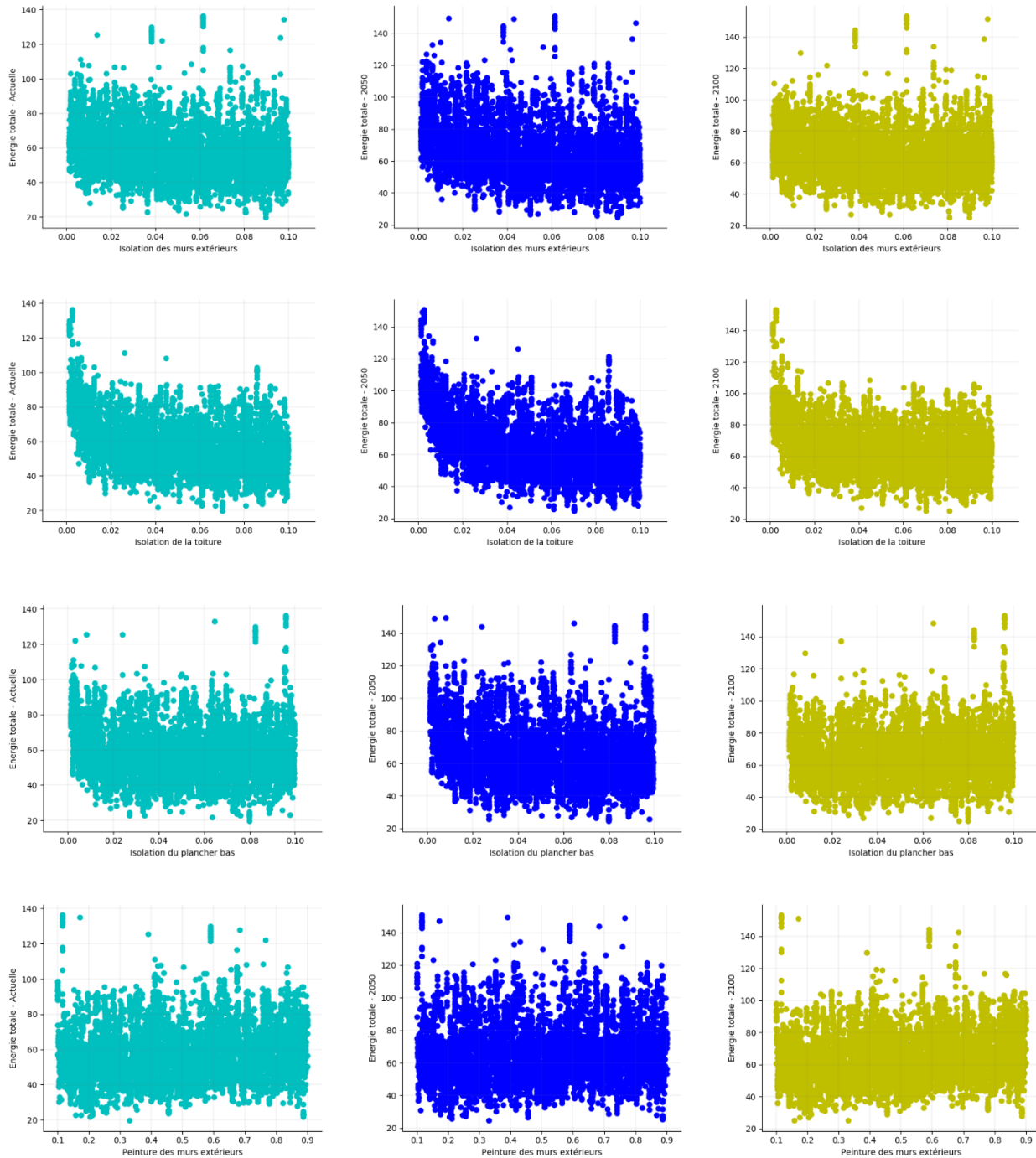
Figure 4-22 - Indices de sensibilité pour le scénario B1

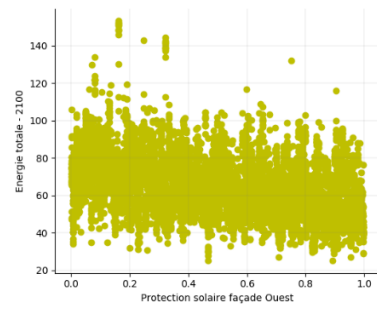
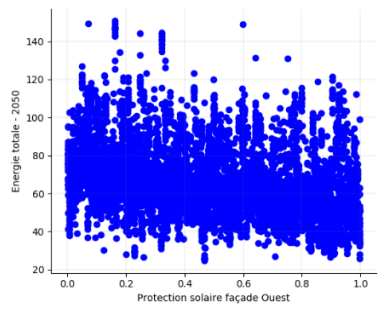
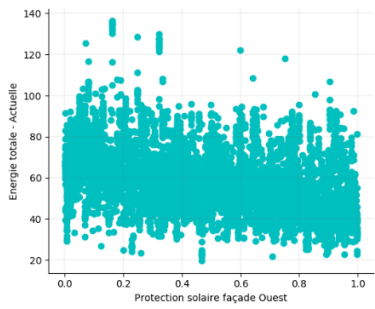
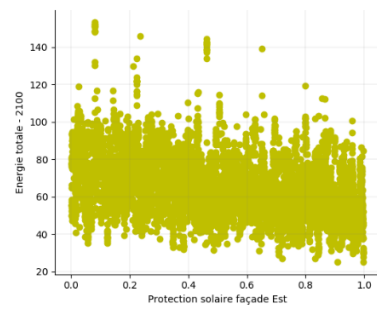
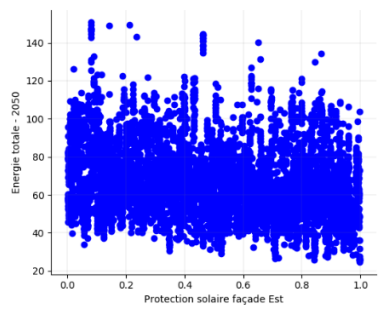
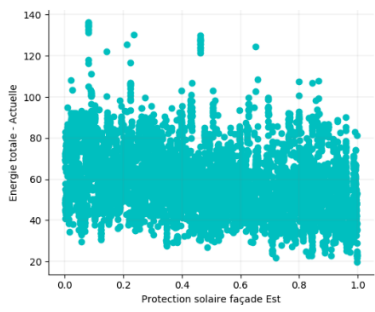
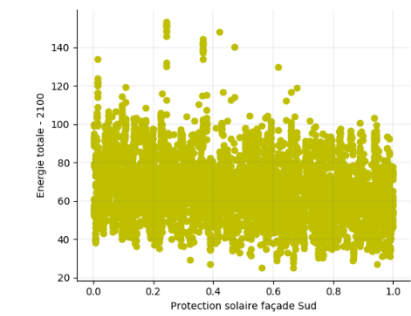
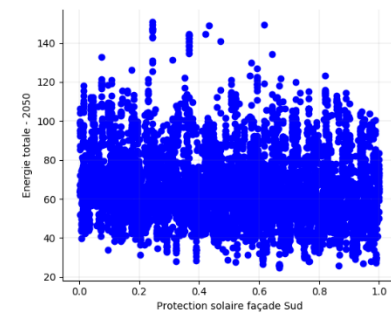
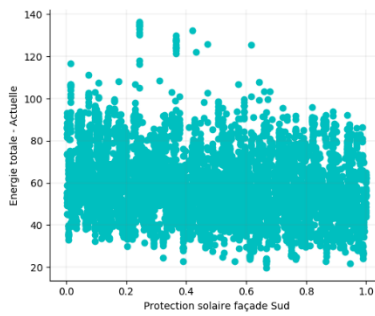
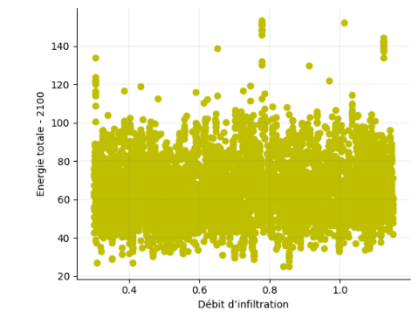
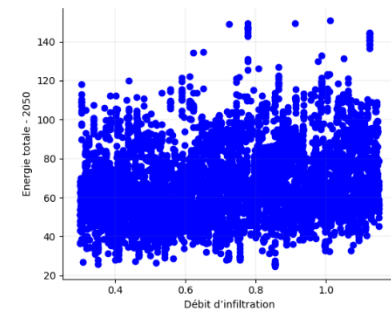
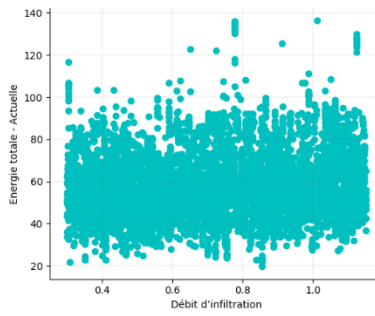
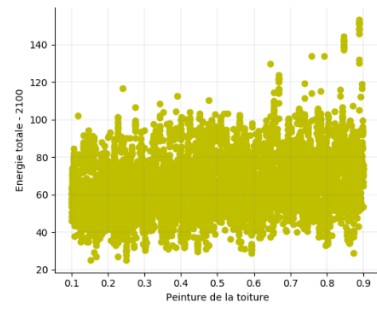
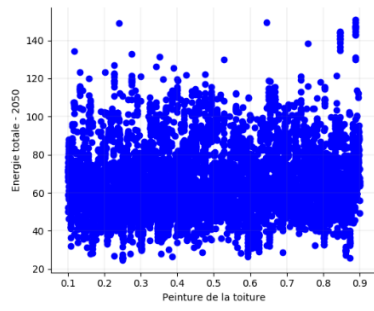
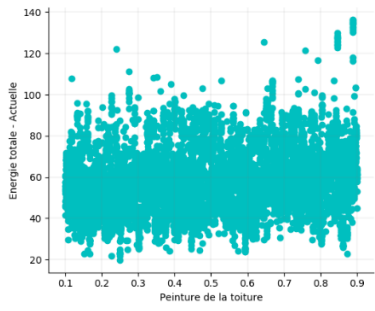
Nous déduisons de cette analyse que, pour notre bâtiment modèle :

- Le paramètre le plus influent pour les trois scénarios est l'isolation de la toiture. L'influence de cette dernière baisse avec les années pour donner plus de poids aux autres paramètres.
- L'utilisation des protections mobiles a plus d'impact que la variation du type des vitrages
- L'utilisation des protections mobiles acquiert de plus en plus de poids avec le temps, compte tenu de l'augmentation des degrés-jours de climatisation. Il est judicieux de bien protéger les façades Est et Ouest du bâtiment afin de réduire les besoins énergétiques ;
- L'isolation du plancher bas augmente les besoins énergétiques pour l'horizon 2100, car elle ne permet pas de profiter de la fraîcheur du sol pendant l'été pour baisser les températures intérieures ;
- Le choix des couleurs sombres pour la toiture et les murs extérieurs fait augmenter de plus en plus les besoins énergétiques. Il est ainsi recommandé de choisir des couleurs claires pour la toiture et les murs extérieurs pour optimiser les besoins énergétiques.

## Exploration de l'espace des paramètres d'entrée par l'échantillonnage de SOBOL

Nous présentons ci-dessous, pour chaque paramètre et par année (présent, 2050 et 2100 pour le scénario B1), l'exploration de l'espace de variation des paramètres d'entrée par l'algorithme d'échantillonnage de la méthode de Sobol. L'affichage est fait avec des nuages de points. L'axe des ordonnées correspond à l'énergie totale obtenue pour chaque combinaison de l'échantillonnage.





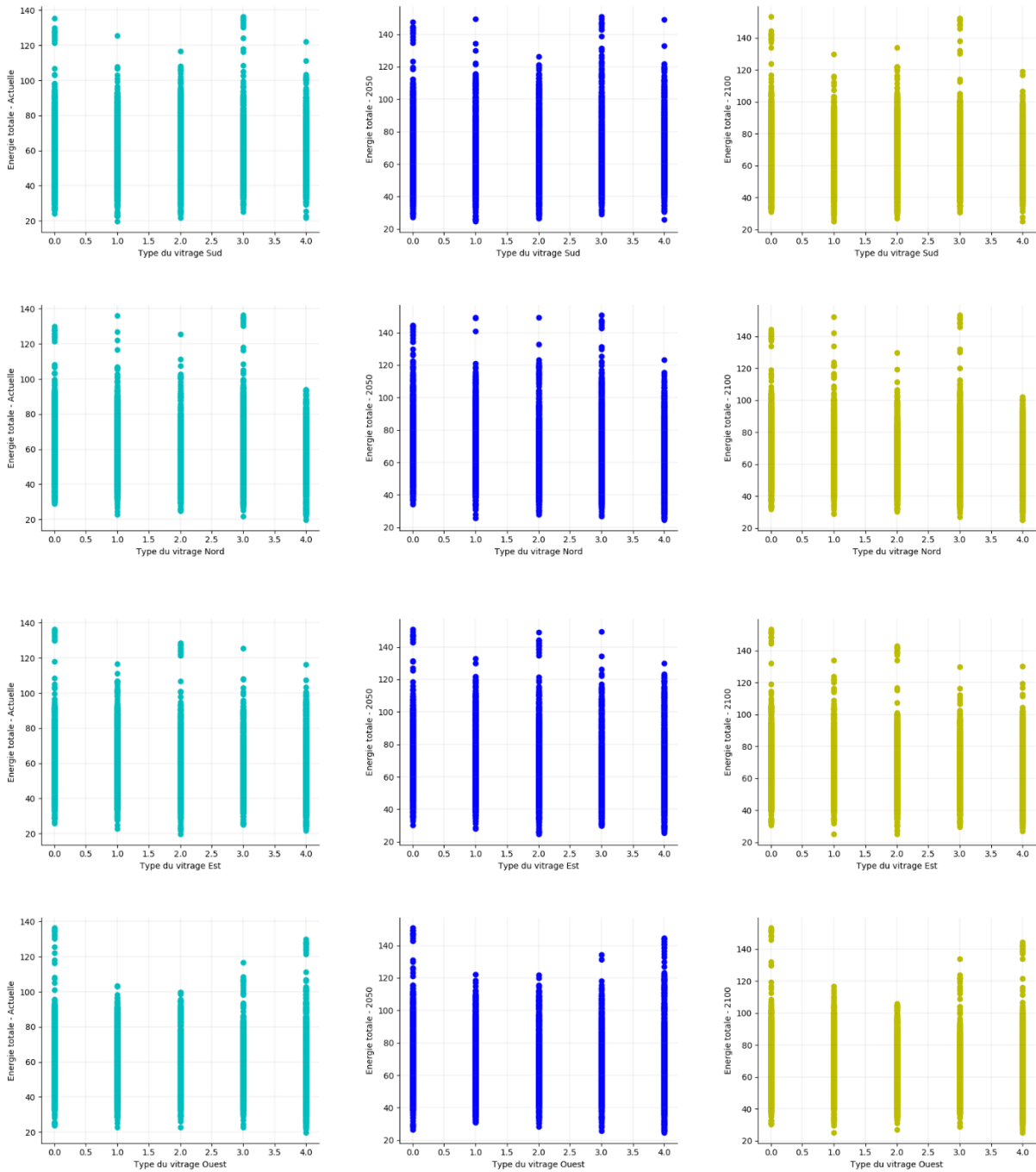


Figure 4-23 - Exploration de l'espace des paramètres d'entrée par l'échantillonnage de SOBOL

Nous remarquons qu'il n'existe pas de relation de linéarité entre les fonctions énergétiques et les paramètres d'entrée. Notre modèle étant complexe, les fonctions énergétiques dépendent de la variation de l'ensemble des paramètres d'entrée.

### 5.3.2. Scénario A2 :

Nous présentons ci-dessous les indices de sensibilité des trois fonctions énergétiques, pour le scénario A2.



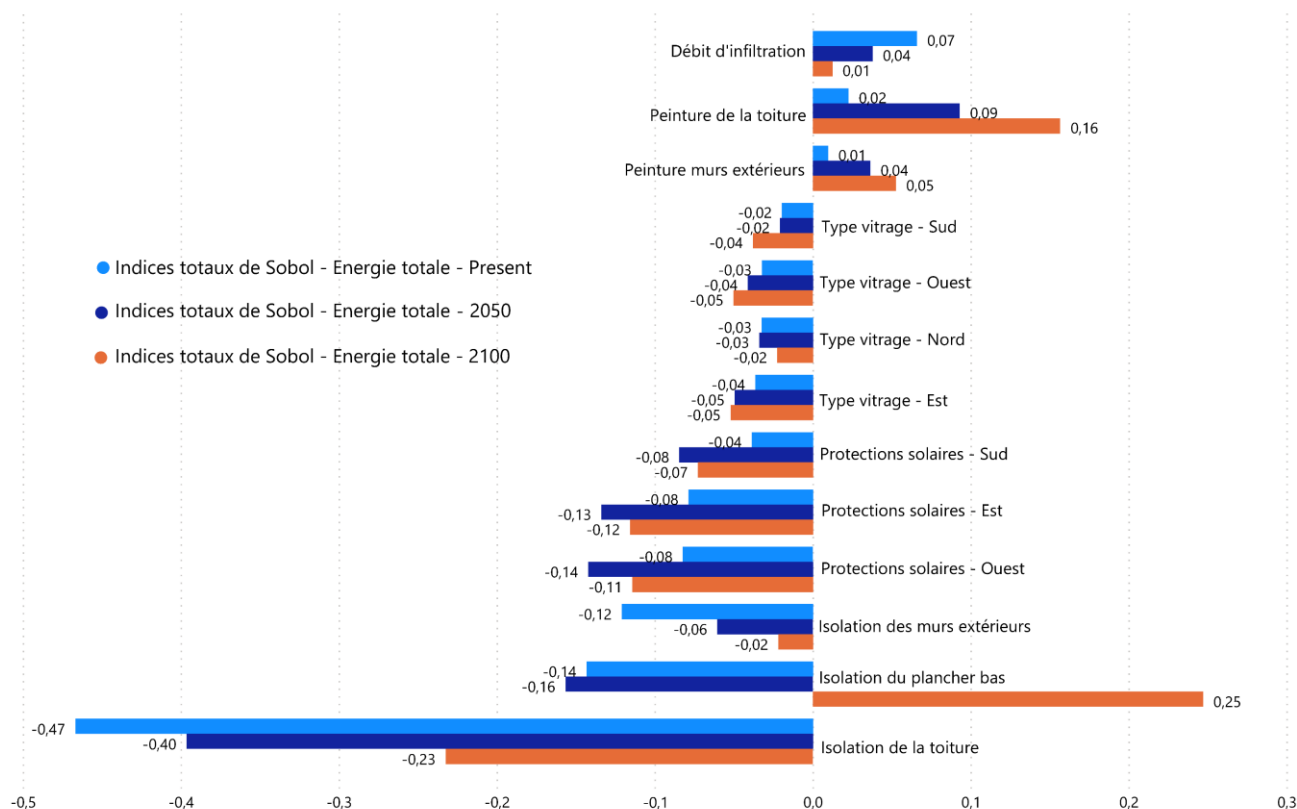


Figure 4-24 - Indices de sensibilité pour le scénario A2

Le scénario pessimiste souligne l'importance de faire attention à l'isolation du plancher bas et au choix des peintures extérieures.

Les conclusions tirées sont similaires à celles du précédent scénario.

Nous déduisons de ce paragraphe que les deux méthodes Sobol et Morris permettent d'avoir une bonne compréhension des modèles étudiés. L'analyse de sensibilité est ainsi primordiale dans l'énergétique des bâtiments, et son application prend tout son intérêt dans le processus de conception des bâtiments à haute performance énergétique.

## 6. OPTIMISATION MULTICRITERE

### 6.1. Problème d'optimisation

Pour notre cas d'optimisation, deux méthodologies seront utilisées dans ce paragraphes, avec des algorithmes génétiques NSGA-II :

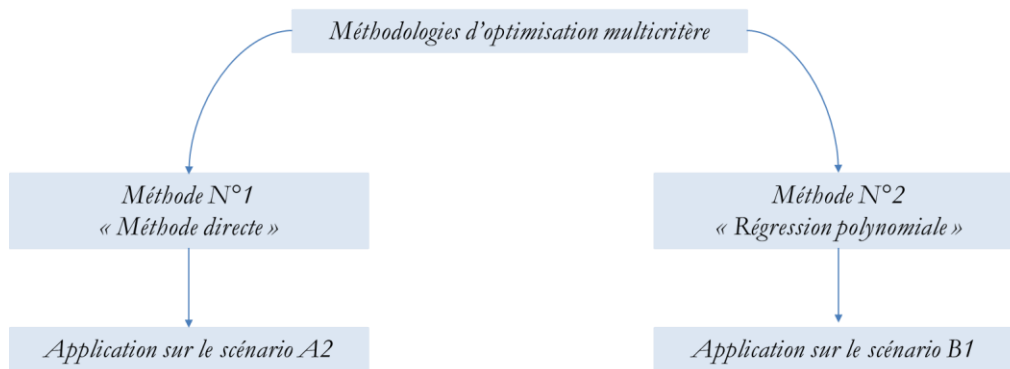


Figure 4-25 - Méthodologies d'optimisation

Nous allons ainsi résoudre le problème d'optimisation ci-dessous :

Minimiser les fonctions :  $f_1(X), f_2(X), f_3(X), f_4(X), f_5(X)$

Sous contraintes :  $f_1(X), f_2(X), f_3(X) \leq 40 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$

## 6.2. Optimisation directe : Scénario pessimiste A2

La première méthode, désignée comme une « méthode directe », est basée sur le processus itératif ci-dessous :

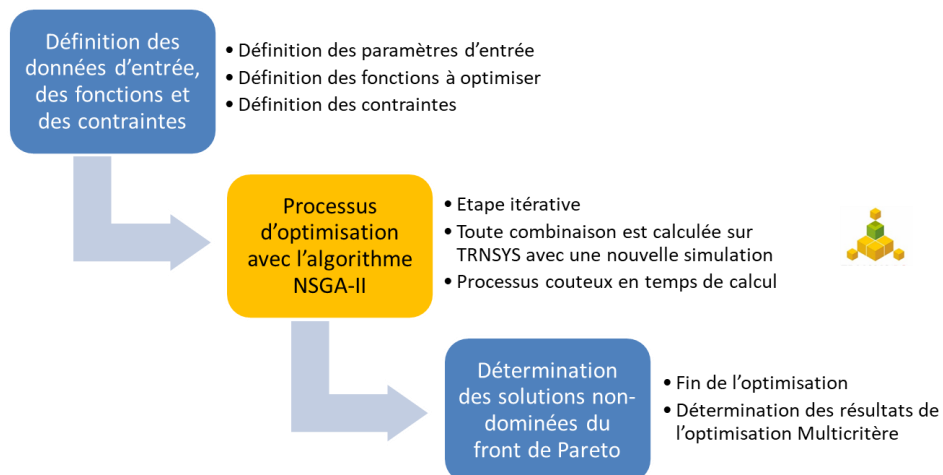


Figure 4-26 - Méthodologie de la méthode directe

Nous présentons ci-dessous les solutions pour le scénario A2. Les solutions minimisant chacune des fonctions sont :

Tableau 4-5 - Combinaisons optimales

Paramètres d'entrée Fonctions de sorties	$\text{Min}(f_1(X))$	$\text{Min}(f_2(X))$ $\text{Min}(f_3(X))$	$\text{Min}(f_4(X))$	$\text{Min}(f_5(X))$
Isolation des murs extérieurs	0,08	0,08	0,07	0,05
Isolation de la toiture	0,09	0,07	0,09	0,07
Isolation du plancher bas	0,05	0,05	0,01	0,05
Peinture des murs extérieurs	0,5	0,4	0,17	0,36
Peinture de la toiture	0,3	0,3	0,17	0,14
Débit d'infiltration	0,5	0,4	0,35	0,37
Protection solaire vitrage sud	0,89	0,99	0,55	0,87
Protection solaire vitrage est	0,97	0,92	0,66	0,78
Protection solaire vitrage ouest	1,00	0,81	0,81	0,85

Type du vitrage Sud	2	3	2	0
Type du vitrage Nord	5	5	2	3
Type du vitrage Est	5	1	2	0
Type du vitrage Ouest	2	5	2	1
$f_1(X)$ = Energie actuelle (kWh)	18,04	18,95	32,64	38,71
$f_2(X)$ = Energie en 2050 (kWh)	15,34	15,23	27,90	30,68
$f_3(X)$ = Energie en 2100 (kWh)	20,48	19,76	31,97	36,39
$f_4(X)$ = Surcoût d'investissement (MAD)	20286	23159	10407	12896
$f_5(X)$ = Energie grise (kWh)	5901	5948	4328	3286

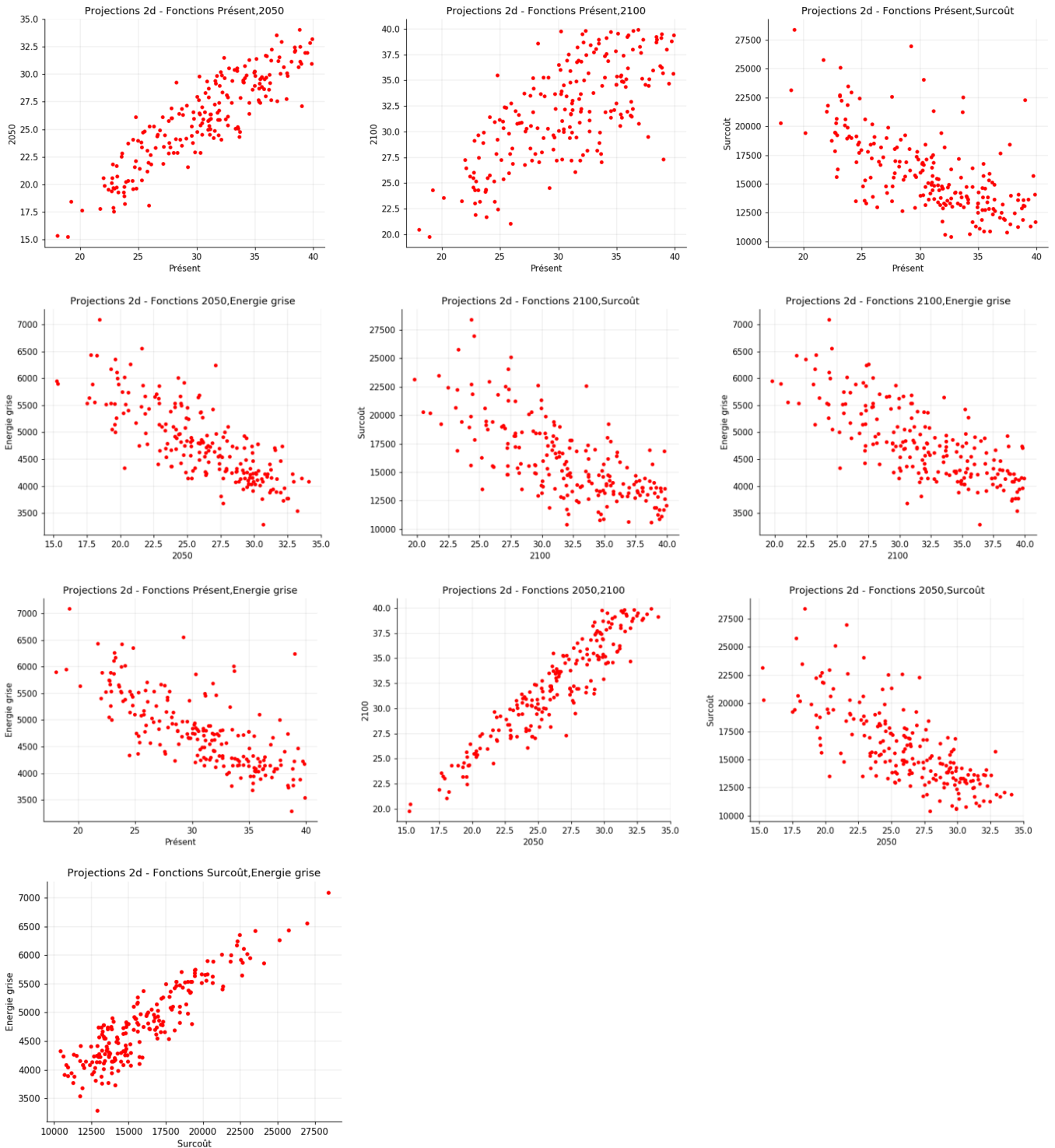


Figure 4-27 - Projections 2D des résultats

Entre les 3 fonctions énergétiques (actuelle, en 2050 et en 2100) nous retrouvons une linéarité des résultats (généralement en optimisant l'une d'elle on optimise l'autre). Cependant, nous retrouvons la forme du « front de Pareto » entre les fonctions énergétiques et les fonctions économique / environnementale. En effet, en réduisant les besoins énergétiques on augmente le surcoût d'investissement et l'énergie grise. Nous réalisons des boîtes à moustache pour chaque paramètre des combinaisons du front de Pareto (solutions optimales). Les résultats sont donnés ci-dessous :

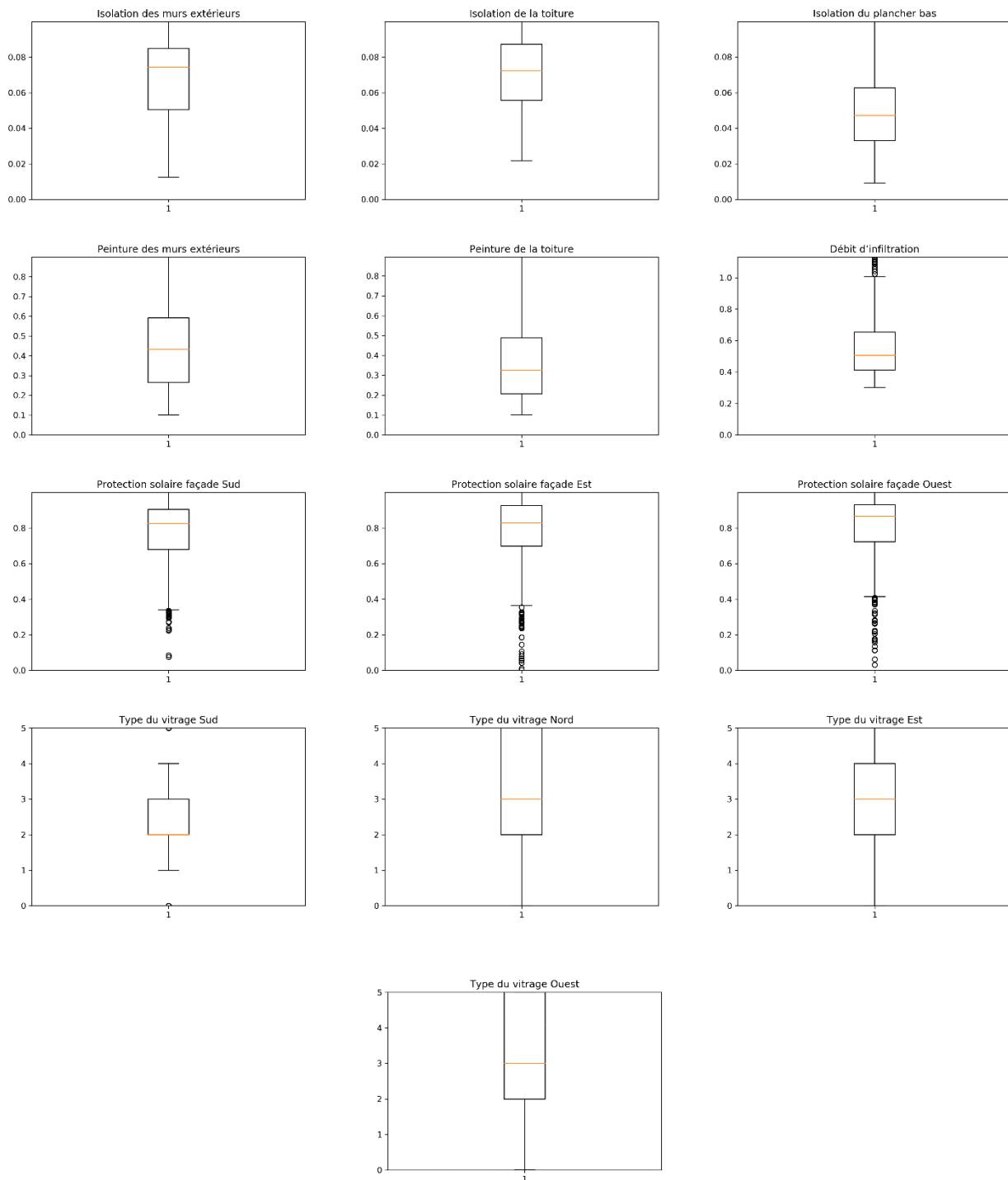


Figure 4-28 - Boîtes à moustaches pour les 13 inputs

En plus d'être en conformité avec l'approche performantielle du RTCM, les solutions du front de Pareto sont globalement en concordance avec l'approche perspective.

L'optimisation directe sur *TRNSYS* permet d'avoir de bons résultats, les combinaisons optimales donnent un bâtiment conforme aux exigences de la réglementation thermique, efficace énergétiquement, économiquement et respectueux de l'environnement.

Les préconisations tirées de cette optimisation sont :

- Nécessité de bien isoler la toiture et les murs extérieurs pour avoir un bâtiment performant à l'horizon 2100 ;
- Le plancher bas doit être moyennement isolé. L'excès d'isolation de ce dernier induit à une augmentation des besoins énergétiques à l'horizon 2100 comme indiqué dans les analyses de sensibilité ;
- La peinture des murs extérieurs doit être claire à l'horizon 2100 (blanc à orange par exemple) ;
- La peinture de la toiture doit être claire pour tous les horizons ;
- Les débits d'infiltration doivent être faibles (bonne étanchéité à l'air) ;
- Les protections solaires doivent être utilisées pour les 3 façades ;
- Les vitrages Nord (façade déperditive) et Est doivent être performants à l'horizon actuel, et le vitrage Ouest doit l'être à l'horizon 2050 ;
- Pour la variante la plus intéressante économiquement, l'isolation du plancher bas n'est pas proposée, les peintures sont blanches et les protections solaires sont utilisées entre 50 et 60% pour les façades sud et est respectivement, et à 80% pour la façade ouest. Des triples vitrages sont proposés pour toutes les façades ;
- Pour la variante la plus intéressante sur le volet environnemental, le vitrage le plus performant est proposé pour la façade déperditive (Nord). Les autres façades disposent de simples ou doubles vitrages.

Nous concluons de cette analyse qu'il est indispensable de prendre en considération les répercussions du réchauffement climatique dans la conception des bâtiments actuels, afin qu'ils soient performants durant tout leur cycle de vie.

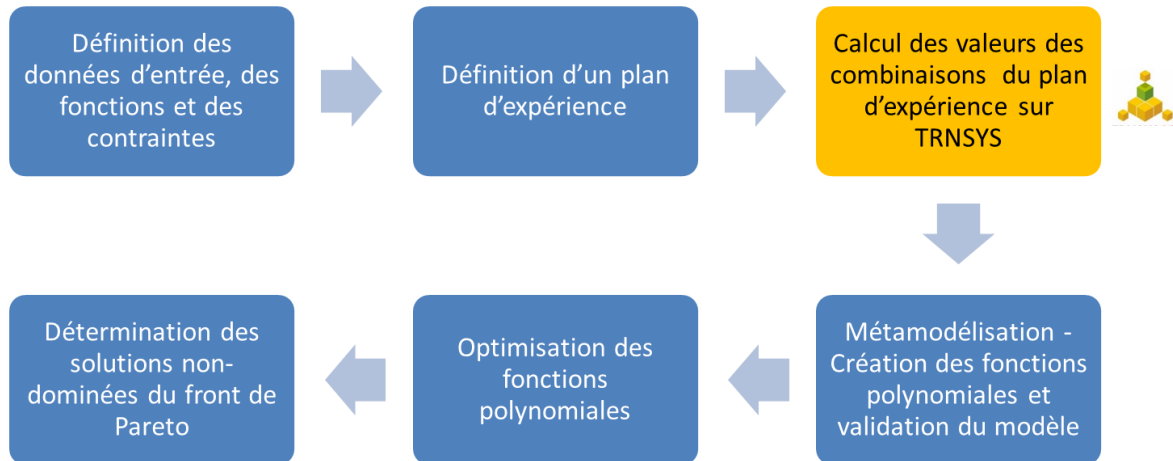
Dans ce paragraphe, notre méthodologie reposait sur le recours à des simulations directes sur *TRNSYS*, ce qui nécessite un temps de calcul très important. Ceci peut vite fait s'avérer un handicap pour l'utilisation de ces différents outils dans l'étude des bâtiments à haute efficacité énergétique et des systèmes.

Pour remédier à cette problématique, nous allons proposer dans les paragraphes suivants de faire de la « métamodélisation » des fonctions de *TRNSYS*, via des techniques de régression, afin d'optimiser le temps de calcul.

### 6.3. Optimisation par utilisation des plans d'expérience :

#### Scénario B1

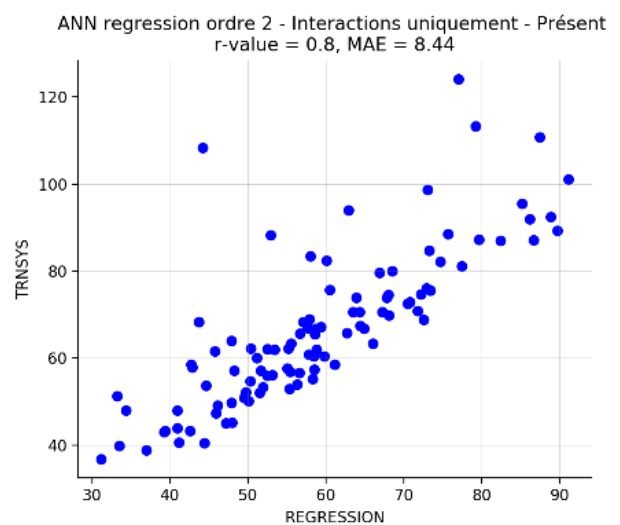
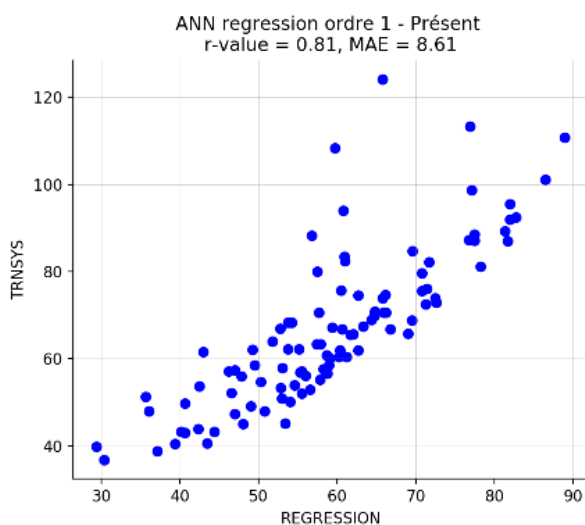
Nous exploitons dans ce chapitre les résultats des calculs effectués par l'échantillonnage de l'analyse de sensibilité avec la méthode de Sobol pour l'énergie totale, afin de bâtir notre plan d'expérience. La méthode est basée sur le processus ci-dessous :



#### 6.3.1. Précision du modèle

Nous générons aléatoirement 100 combinaisons des paramètres d'entrée, afin de juger de la précision des métamodélisations. Nous présentons ci-dessous les résultats pour :

- *Modèle d'ordre 1*
- *Modèle d'ordre 2, interactions uniquement*
- *Modèle d'ordre 2 complet*
- *Modèle d'ordre 3, interactions uniquement*



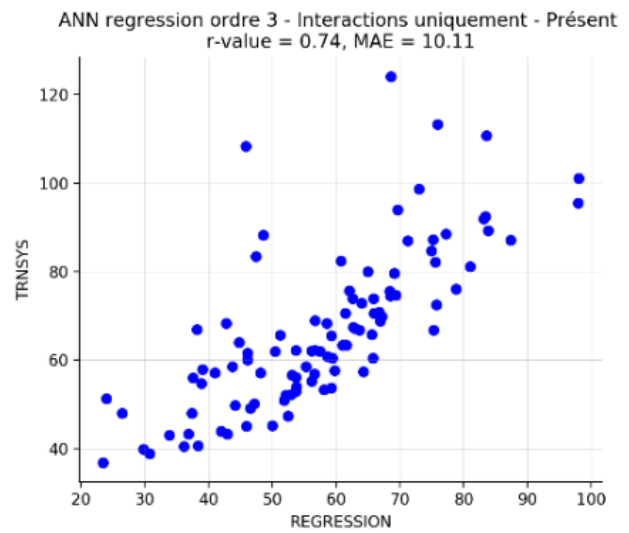
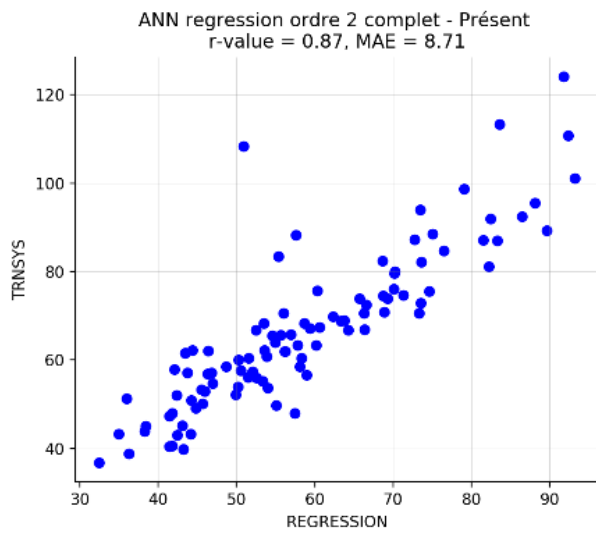


Figure 4-29 - Scénario présent - modèles d'ordre 1, 2 et 3

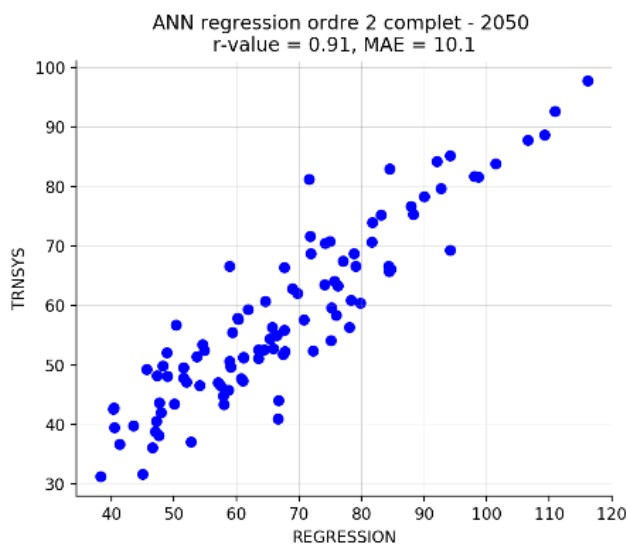
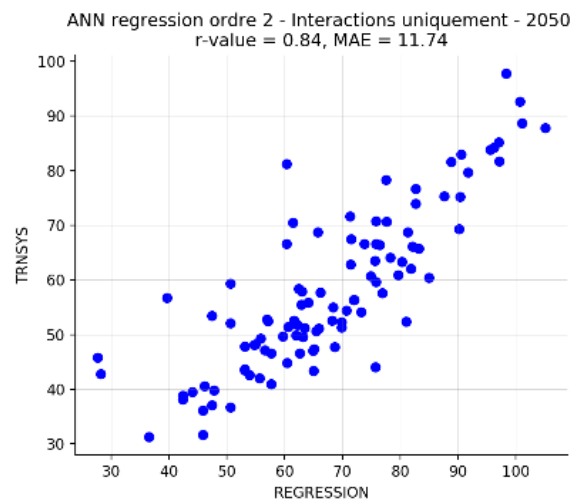
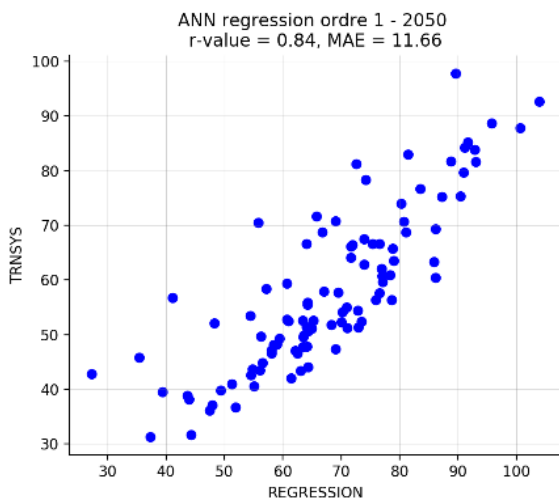


Figure 4-30- Scénario 2050 - modèles d'ordre 1, 2 et 3

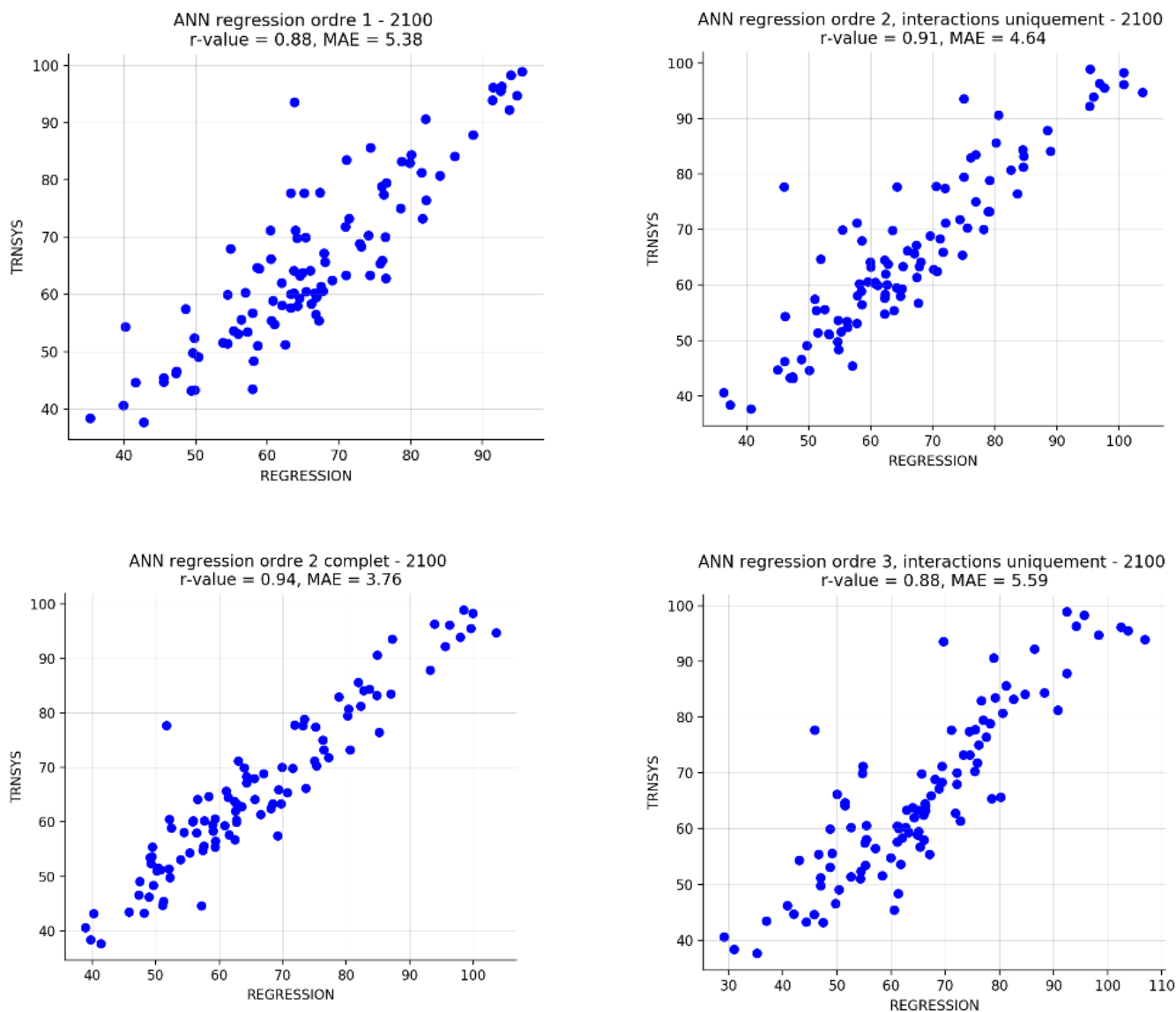


Figure 4-31 - Scénario 2100 - modèles d'ordre 1, 2 et 3

Nous remarquons que le meilleur modèle de régression pour les trois fonctions (énergie totale actuelle, aux horizons 2050 et 2100) est le modèle polynomial d'ordre 2 avec interactions. On obtient des coefficients  $R^2$  généralement supérieurs à 0,9. Nous constatons que la qualité de la régression se détériore à partir de l'ordre 3, le modèle construit devient en effet très fidèle à l'échantillonnage qui a permis de le construire (modèle d'apprentissage), et la prédiction des résultats du nouvel échantillonnage aléatoire s'avère moins précise. Il s'agit du phénomène de l'« *Overfitting* ».

Par conséquent, nous préconisons dans la suite de ce travail d'utiliser le modèle d'ordre 2 avec interactions, qui présente un bon compromis entre précision et temps de calcul.



### 6.3.2. Résultats de l'optimisation

Dans ce paragraphe, nous ne présentons que les solutions non-dominées (front de Pareto) du problème étudié avec la régression polynomiale.

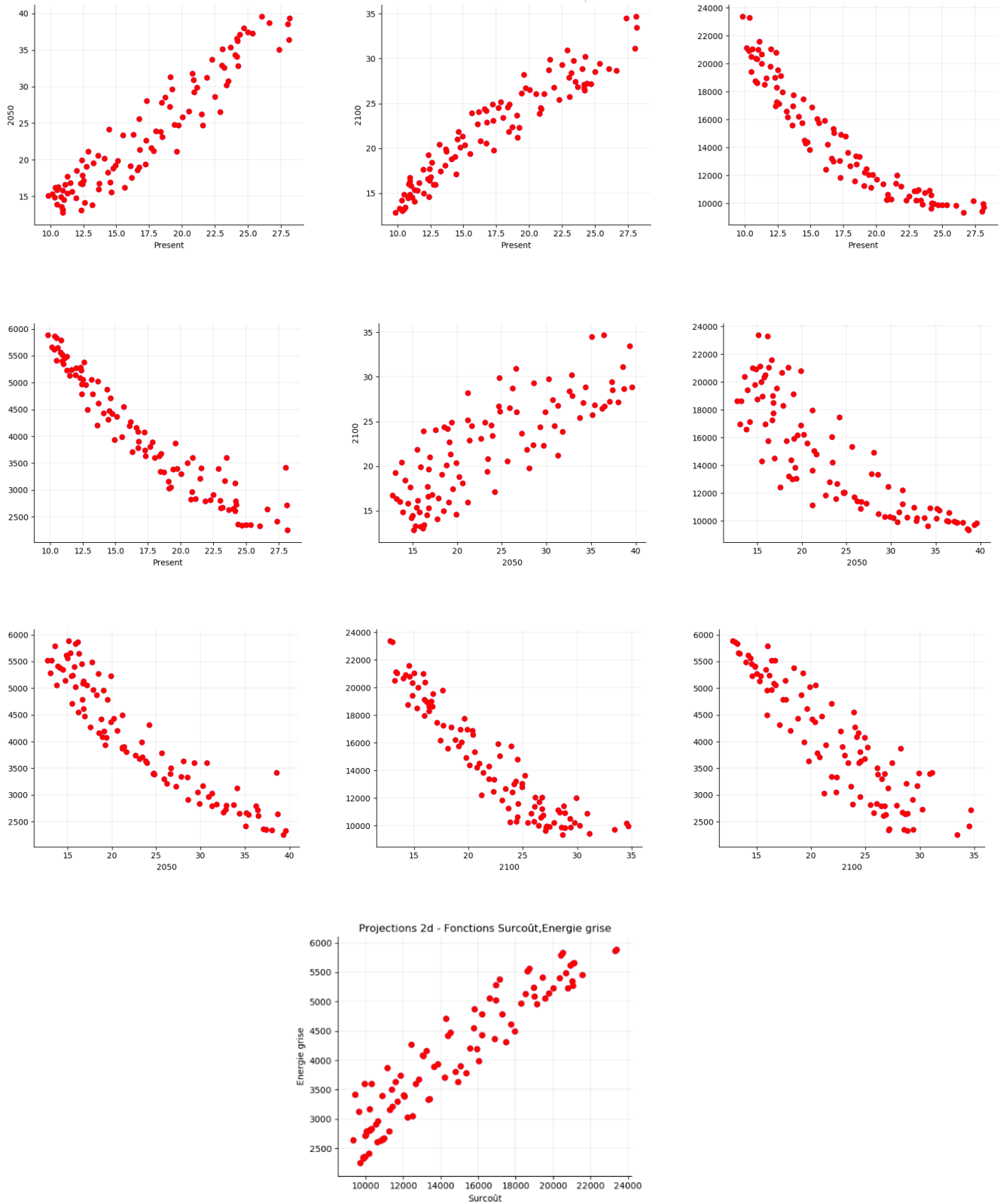


Figure 4-32 - Projections 2D du front de Pareto pour le scénario B1

Les résultats optimisant les 3 fonctions sont donnés ci-dessous, avec une comparaison avec les résultats « exactes » obtenus par ces combinaisons sur TRNSYS :

Tableau 4-6 - Solutions optimales et comparaison avec TRNSYS

Présent (kWh/m <sup>2</sup> /an)		2050 (kWh/m <sup>2</sup> /an)		2100 (kWh/m <sup>2</sup> /an)		Surcoût (Dirhams)	Energie grise (kWh)
Régression	TRNSYS	Régression	TRNSYS	Régression	TRNSYS		
9,9	<b>13,3</b>	13,5	<b>11,3</b>	13,8	<b>15,5</b>	23 380	6343
<b>9,7</b>	<b>14,2</b>	<b>12,4</b>	<b>11,7</b>	14,0	<b>16,0</b>	22 952	6099
<b>10,3</b>	<b>16,7</b>	16,6	<b>10,7</b>	<b>12,3</b>	<b>13,1</b>	24 837	6511

Nous déduisons que l'optimisation via les plans d'expérience donne des bons résultats au problème étudié, avec les mêmes préconisations quant au choix des paramètres d'entrée que le scénario A2.

L'utilisation de la régression polynomiale permet ainsi de bien modéliser les fonctions de sortie des outils de simulation thermique dynamique et d'avoir des bons résultats d'optimisation en seulement quelques minutes.

En effet, dès que le modèle polynomial d'une fonction est généré, la réalisation des optimisations, des analyses de sensibilité ou de n'importe quelle autre étude peut se faire de façon instantanée car les fonctions « boîtes noires » de TRNSYS acquièrent une forme mathématique, avec une bonne précision comme analysé avec les coefficients  $R^2$  et MAE.

Avec cette méthode et en choisissant des plans d'expériences réduits, nous pouvons diviser le temps de calcul par un coefficient de 5 ou plus par rapport aux optimisations directes via TRNSYS.

### 6.3.3. Comparaison des algorithmes

Dans ce paragraphe, nous comparons visuellement les résultats des optimisations via les algorithmes de *Platypus* décrits précédemment, pour le scénario B1. Nous profitons de la modélisation polynomiale des trois fonctions énergétiques afin de réaliser des optimisations peu coûteuses (quasi instantanées) en temps de calcul avec les différents algorithmes.

Nous présentons le 3 fonctions  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  en axes et le surcoût en couleur. L'énergie grise ne sera pas affichée. Seuls les fronts de Pareto sont représentés.

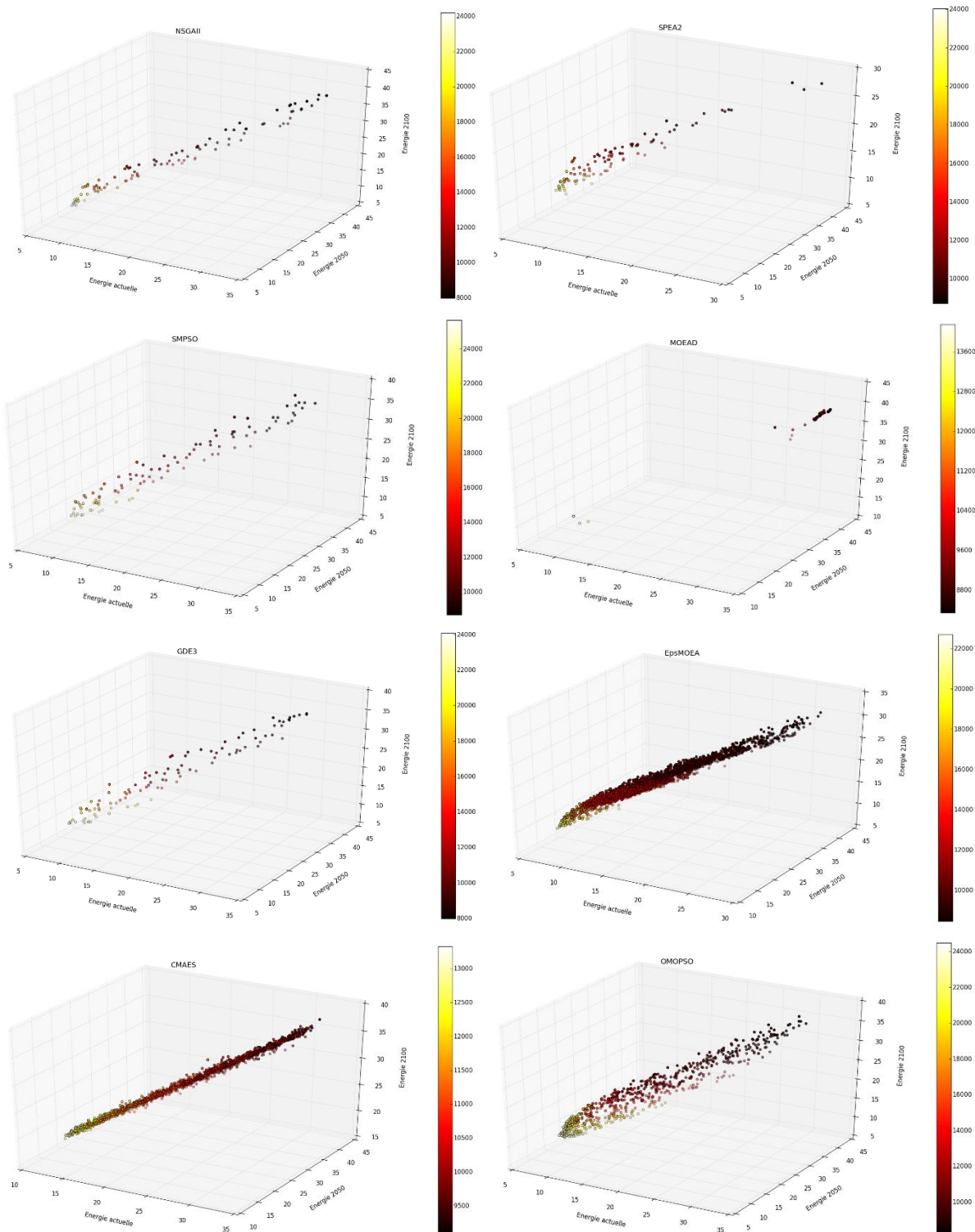


Figure 4-33 - Comparatif des algorithmes d'optimisation pour le scénario B1

Les différents algorithmes permettent d'obtenir des résultats satisfaisants. La durée de calcul est différente d'un algorithme à l'autre. Les algorithmes EpsMOEA, CMAES et OMOPSO permettent d'avoir plus de résultats non-dominés, mais avec un temps de calcul plus important que les autres algorithmes. L'algorithme NSGA-II présente un bon compromis entre les bons résultats de son front de Pareto et le temps de calcul nécessaire, justifiant son utilisation dans le cadre de cette thèse.

## 6.4. Analyse des deux méthodes d'optimisation

Dans le paragraphe 6, nous avons étudié deux méthodologies d'optimisation qui présentent à la fois des avantages et des inconvénients ; Premièrement, la méthode d'optimisation par algorithmes génétiques directement sur TRNSYS, méthode précise mais très coûteuse en temps de calcul et deuxièmement la méthode d'optimisation par métamodélisation, qui consiste à réaliser des régressions polynomiales pour modéliser les fonctions étudiées avec des polynômes et ensuite les optimiser par les algorithmes génétiques. Cette méthode a l'avantage d'être rapide, mais avec un risque de non-précision des prédictions.

Dans le prochain et dernier paragraphe de cette thèse, nous proposons une méthode innovante qui conjugue les avantages des deux techniques d'optimisation directe et par régression.

## 7. NOUVELLE METHODOLOGIE D'OPTIMISATION ET APPLICATION :

### OPTIMISATION MULTICRITERE DU BATIMENT DANS LES SIX ZONES CLIMATIQUES DU MAROC

L'utilisation de la régression polynomiale décrite dans le paragraphe précédent permet d'avoir des résultats très probants. L'échantillonnage étudié était cependant important (7000 combinaisons des paramètres d'entrée).

Dans ce dernier chapitre, nous allons proposer une nouvelle méthode, et allons l'appliquer à un nouveau problème d'optimisation. Nous étudions ainsi le comportement du bâtiment modèle et de ses 13 paramètres d'entrée dans les six zones climatiques du royaume. Nous choisissons les données météorologiques actuelles, et résoudrons le problème d'optimisation suivant :

$$\text{Optimiser} \left\{ \begin{array}{l} f_1(X) = \text{Energie totale (kWh/m}^2/\text{an)} \text{ à Agadir (Zone 1)} \\ f_2(X) = \text{Energie totale à Tanger (Zone 2)} \\ f_3(X) = \text{Energie totale à Fès (Zone 3)} \\ f_4(X) = \text{Energie totale à Ifrane (Zone 4)} \\ f_5(X) = \text{Energie totale à Marrakech (Zone 5)} \\ f_6(X) = \text{Energie totale à Errachidia (Zone 6)} \\ f_7(X) = \text{Surcoût d'investissement (Dirhams)} \\ f_8(X) = \text{Energie grise (kWh)} \end{array} \right.$$

$$\text{Sous contraintes :} \left\{ \begin{array}{l} f_1(X) \leq 40 \text{ kWh/m}^2/\text{an} \\ f_2(X) \leq 46 \text{ kWh/m}^2/\text{an} \\ f_3(X) \leq 48 \text{ kWh/m}^2/\text{an} \\ f_4(X) \leq 64 \text{ kWh/m}^2/\text{an} \\ f_5(X) \leq 61 \text{ kWh/m}^2/\text{an} \\ f_6(X) \leq 65 \text{ kWh/m}^2/\text{an} \end{array} \right.$$

Les contraintes correspondent aux limites réglementaires (12) pour chaque zone climatique.

## 7.1. Analyse de sensibilité du modèle

Pour ce paragraphe, nous utilisons la méthode de Morris avec un nombre  $N = 300$ .

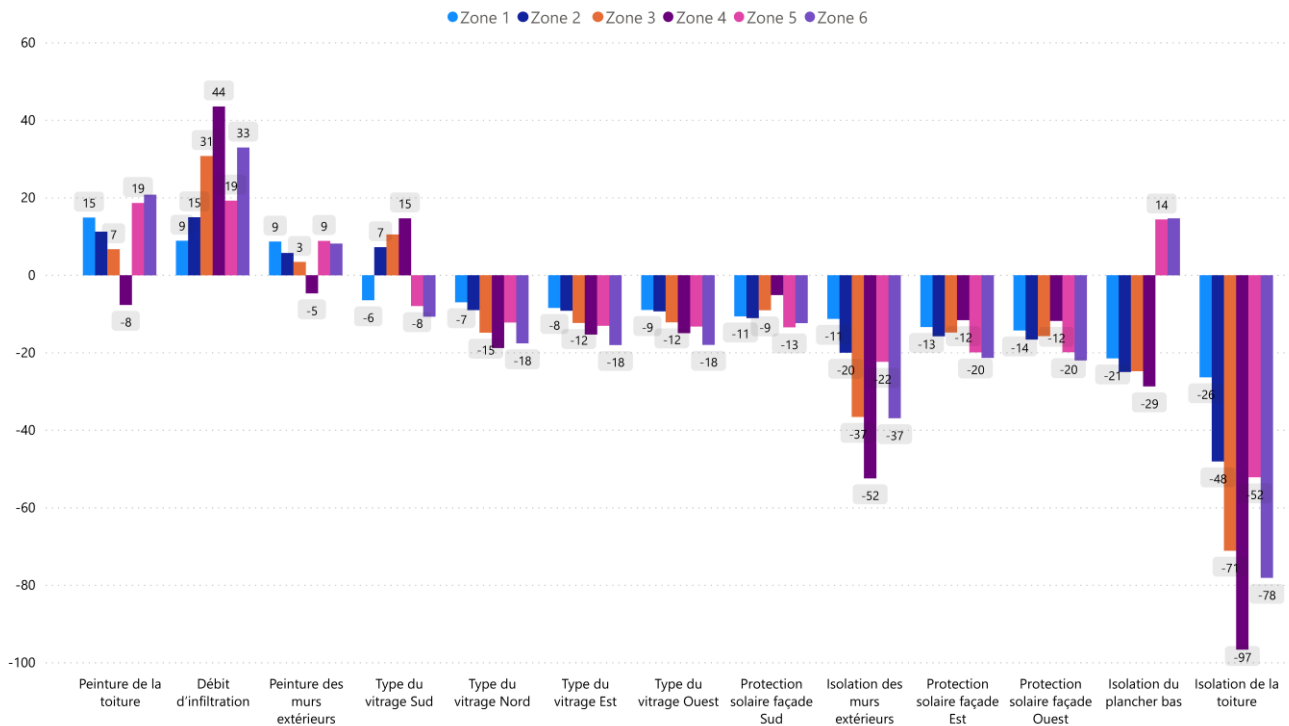


Figure 4-34 - Résultats des analyses de sensibilité Mu, Méthode de Morris

Nous remarquons que certains paramètres peuvent faire augmenter ou bien diminuer les besoins énergétiques selon les zones climatiques :

- Isolation du plancher : ce paramètre est bénéfique dans les zones climatiques 1, 2, 3 et 4 car il permet de réduire les besoins énergétiques, il ne l'est cependant pas pour les zones 5 et 6.
- Peinture des murs extérieurs et de la toiture : l'augmentation de l'absorptivité est bénéfique pour la zone 4 (Ifrane), zone la plus froide en hiver car permet de rapporter plus d'énergie au bâtiment en période hivernale. Il s'agit cependant de l'inverse pour toutes les autres zones.
- Type du vitrage sud : L'amélioration de la qualité du vitrage est bénéfique pour les zones chaudes 5 et 6 et pour la zone 1, et inversement pour les autres zones.
- L'augmentation des valeurs de l'isolation du plancher, des murs extérieurs, du type de vitrages (sauf de la façade sud) et des protections solaires permet de réduire les besoins énergétiques. On s'attend donc à ce que ces paramètres, dans la limite du possible, aient des valeurs maximales dans l'exercice d'optimisation qui va suivre.
- L'augmentation des valeurs du débit d'infiltration fait augmenter les besoins énergétiques. On s'attend donc, dans les optimisations qui suivent, à ce que ce paramètre ait une valeur minimale ;
- Zone 1 (Agadir) : Les paramètres les plus influents sont l'isolation de la toiture et du plancher bas, la peinture de la toiture et les protections solaires Ouest et Est.

- Zone 2 (Tanger) : Les paramètres les plus influents sont respectivement l'isolation de la toiture, du plancher bas et des murs extérieurs et les protections solaires Ouest et Est.
- Zone 3 (Fès) : Les paramètres les plus influents sont l'isolation de la toiture, des murs extérieurs, le débit d'infiltration, l'isolation du plancher bas et les protections solaires Ouest.
- Zone 4 (Ifrane) : Les paramètres les plus influents sont l'isolation de la toiture, des murs extérieurs, le débit d'infiltration, l'isolation du plancher bas et le type du vitrage Nord, façade déperditve en hiver.
- Zone 5 (Marrakech) : Les paramètres les plus influents sont l'isolation de la toiture, des murs extérieurs, les protections solaires Est et Ouest, le débit d'infiltration et la peinture de la toiture.
- Zone 6 (Errachidia) : Les paramètres les plus influents sont l'isolation de la toiture, des murs extérieurs, le débit d'infiltration, les protections solaires Ouest et Est et la peinture de la toiture.

Nous constatons que pour la zone 1, la différence entre les indices de sensibilité des paramètres étudiés n'est pas très significative.

## 7.2. Nouvelle méthodologie d'optimisation proposée dans le cadre de la thèse

Nous allons dans ce paragraphe combiner les techniques d'échantillonnage par plan d'expérience et de régression polynomiale *ANN* et les algorithmes génétiques, afin de proposer une nouvelle méthodologie d'optimisation multicritère peu coûteuse en temps de calcul et performante. La procédure est résumée ci-dessous :

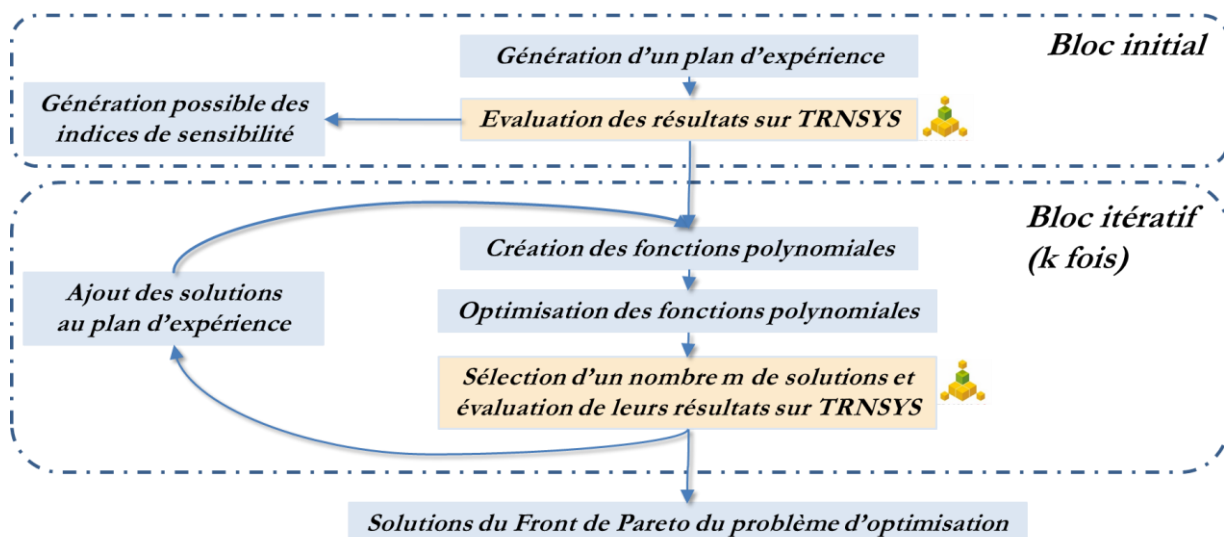


Figure 4-35 - Nouvelle méthodologie d'optimisation multicritère

Cette méthode permettrait de s'affranchir du nombre de simulations important requis par l'optimisation par algorithmes génétiques, et aussi de l'incertitude sur les résultats fournis par la régression polynomiale.

Les optimisations multicritères sont réalisées sur les modèles polynomiaux des fonctions étudiées, ainsi la génération des résultats ne prend que quelques secondes ou minutes. Ces

combinaisons retenues sont ainsi évaluées sur *TRNSYS* et ajoutées aux vecteurs initiaux servant de base pour les métamodélisations.

Le processus peut être répété k plusieurs fois, ou avec un critère d'arrêt, qui peut être par exemple :

- Solutions respectant les contraintes du problème d'optimisation ;
- Un nombre d'itération donné ;
- Atteinte d'un coefficient  $R^2$  ou d'une valeur de l'erreur MAE.

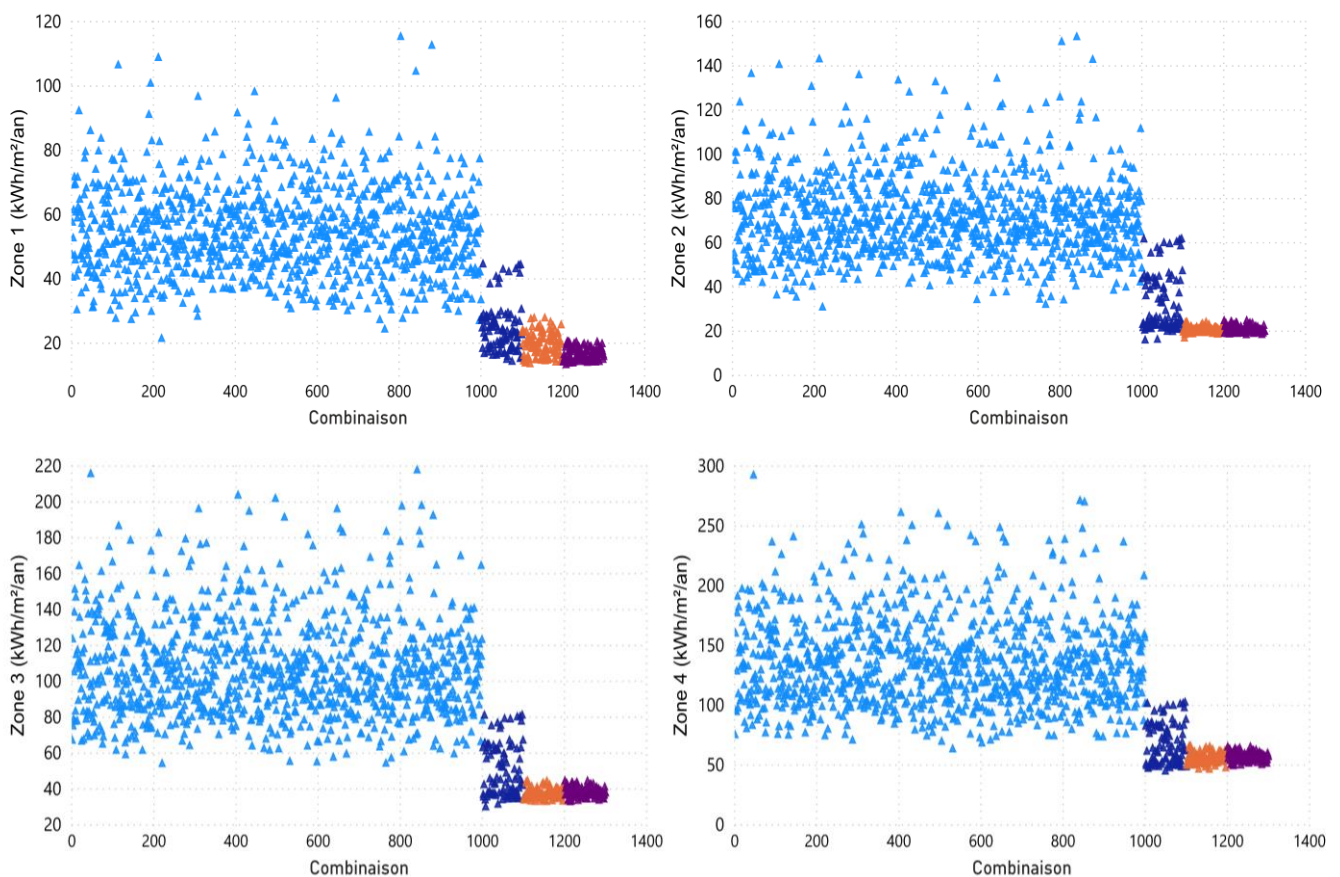
Dans notre cas, nous allons étudier :

- 1<sup>ère</sup> méthode : Plan d'expérience initial de type LHS avec  $n = 1000$  combinaisons,  $m = 100$  combinaisons retenues à chaque optimisation avec  $k = 3$  itérations ;
- 2<sup>ème</sup> méthode : Plan d'expérience initial de type LHS plus réduit avec  $n = 300$  combinaisons,  $m = 30$  combinaisons retenues à chaque optimisation avec  $k = 3$  itérations.

## 7.3. Résultats

### 7.3.1. Plan LHS à 1000 échantillon

Dans les figures ci-dessous, les points en bleu clair correspondent aux échantillonnages initiaux LHS, en bleu foncé / orange / violet les résultats du premier, deuxième et 3<sup>ème</sup> tour d'optimisation respectivement.



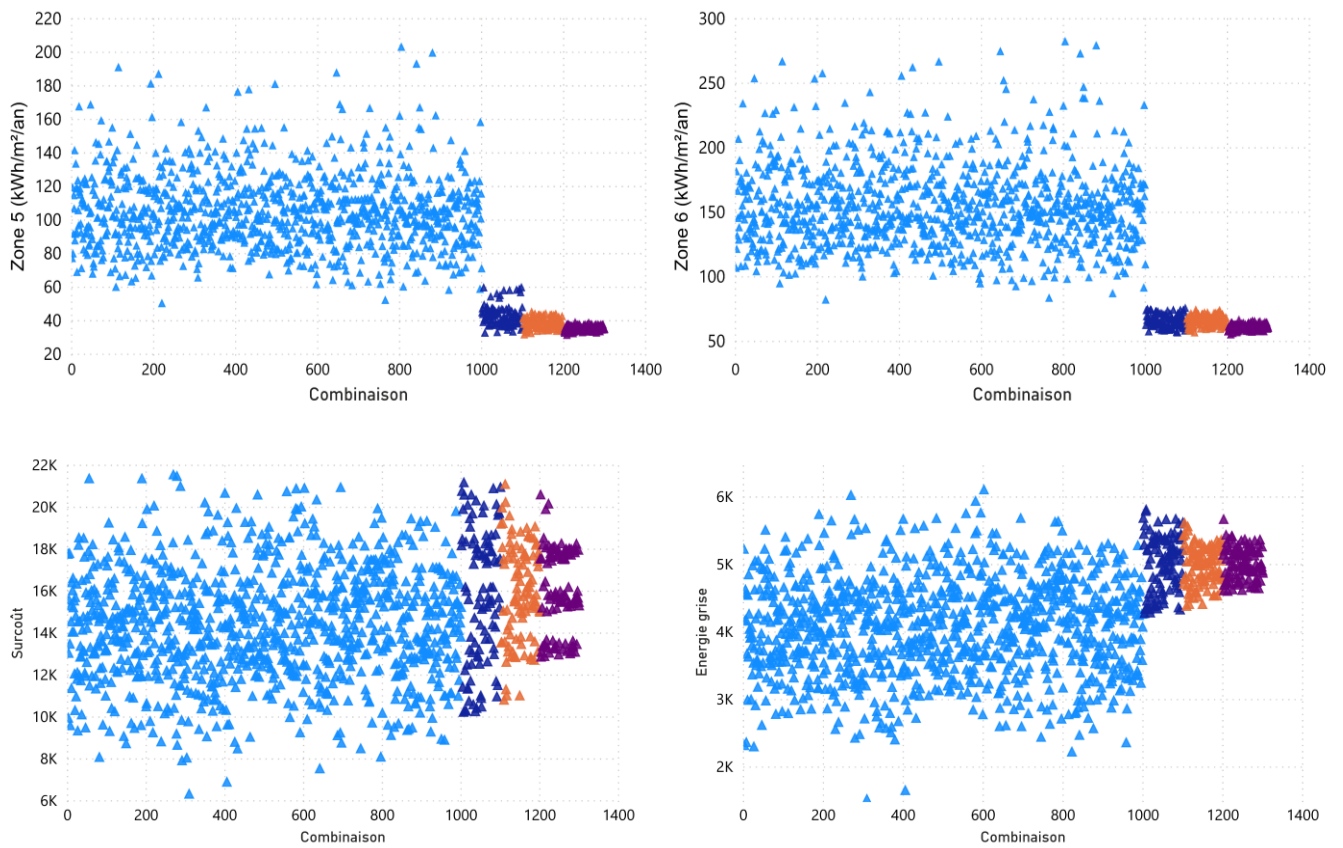


Figure 4-36 - Résultats des optimisations par fonction

Nous remarquons que la zone des solutions à haute efficacité énergétique (fonctions  $f_1$  à  $f_6$ ) est méconnue dans les résultats des combinaisons du plan initial LHS (combinaisons de 0 à 1000). Dès les premières itérations, on obtient de très bons résultats au problème d'optimisation multicritère avec consommations énergétiques pouvant atteindre :

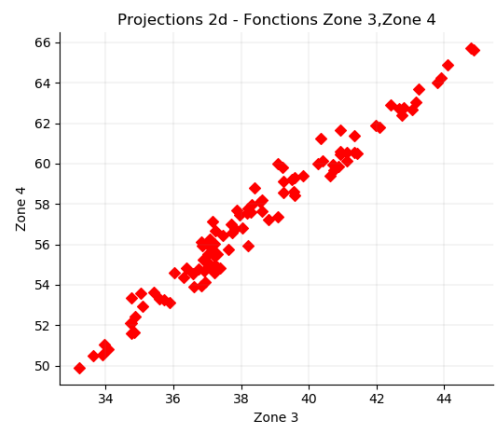
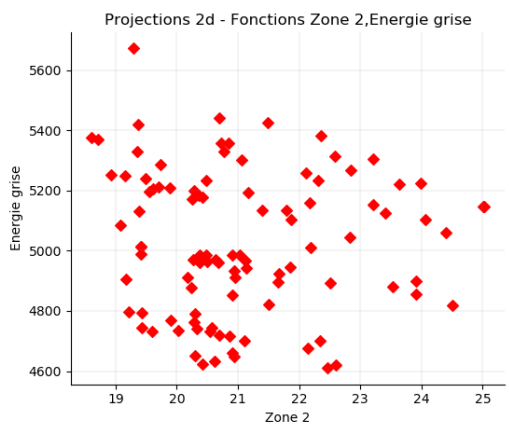
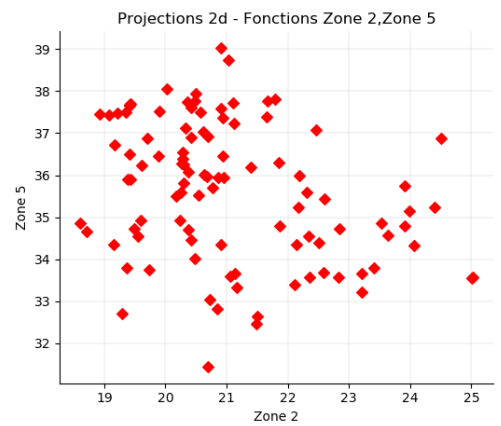
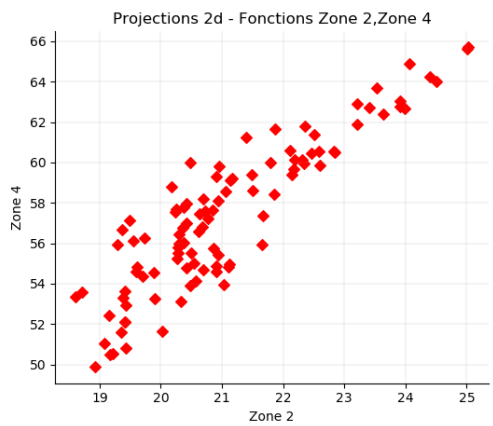
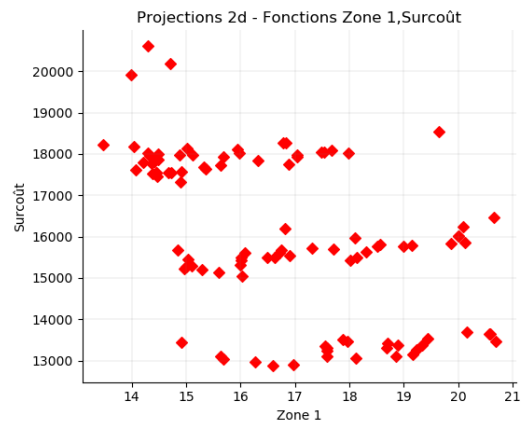
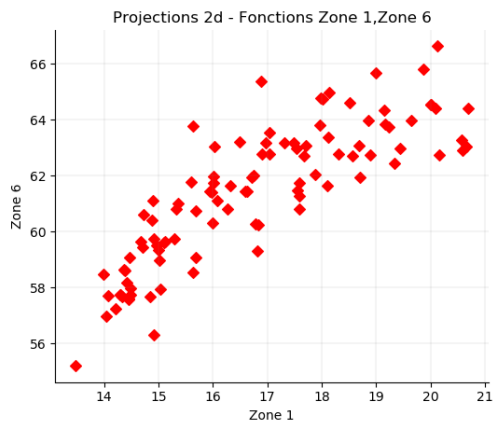
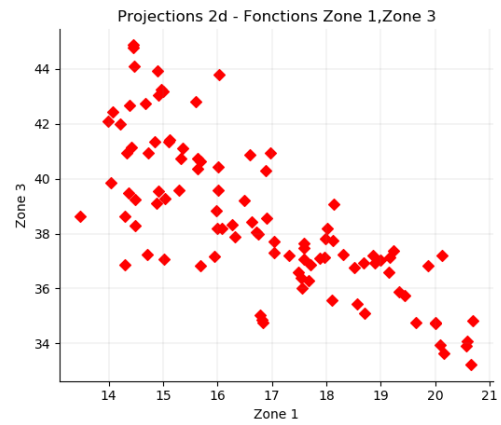
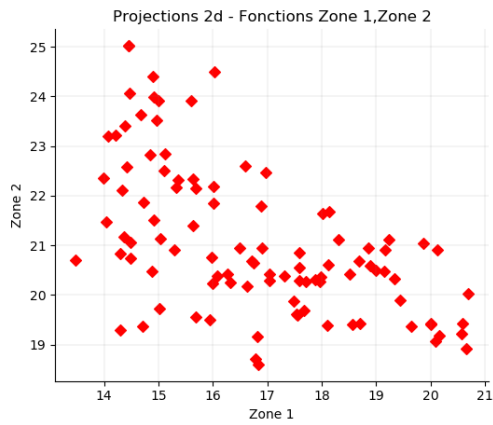
*13,4 kWh/m<sup>2</sup>/an à Agadir ;      16,21 kWh/m<sup>2</sup>/an à Tanger      30,4 kWh/m<sup>2</sup>/an à Fès*

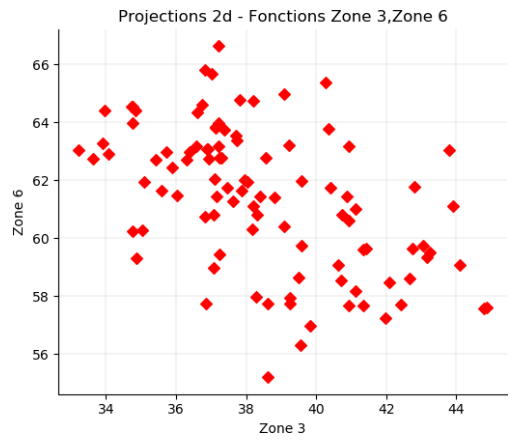
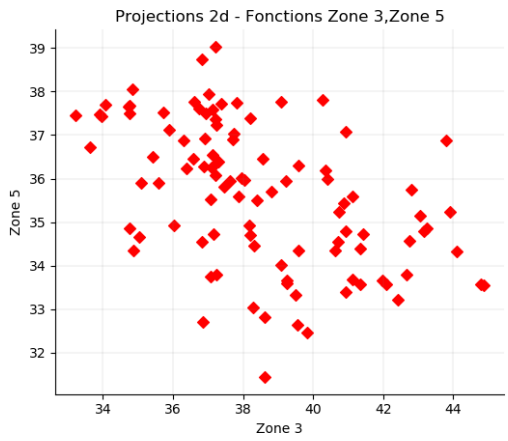
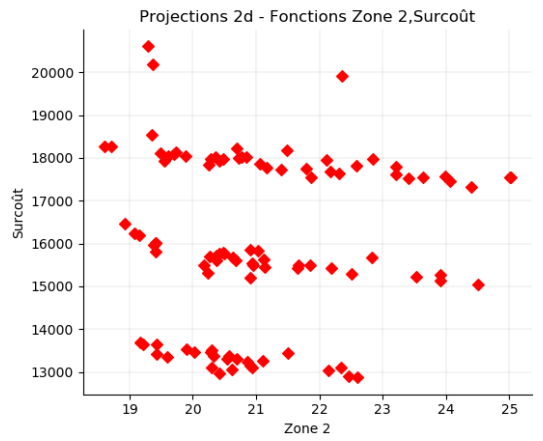
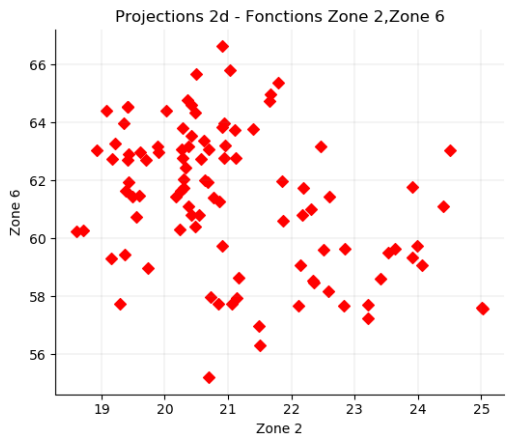
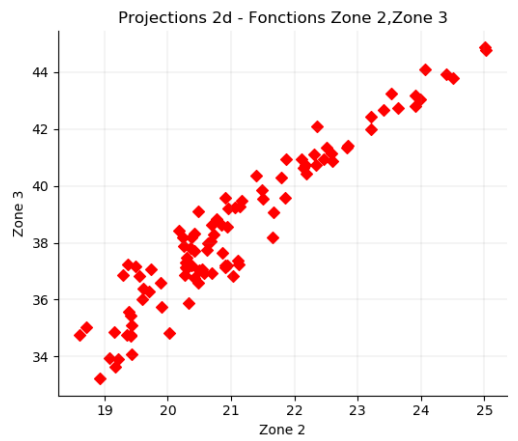
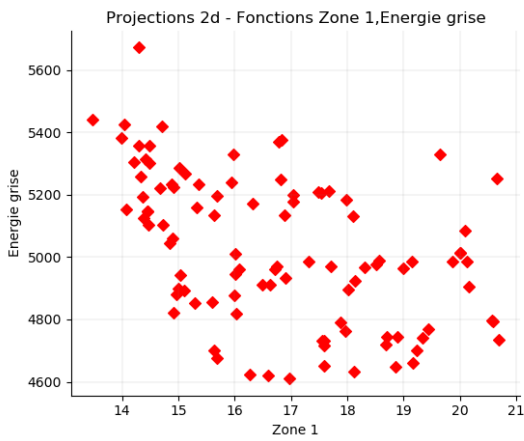
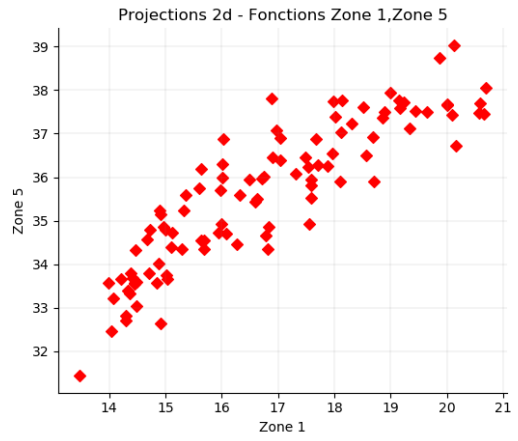
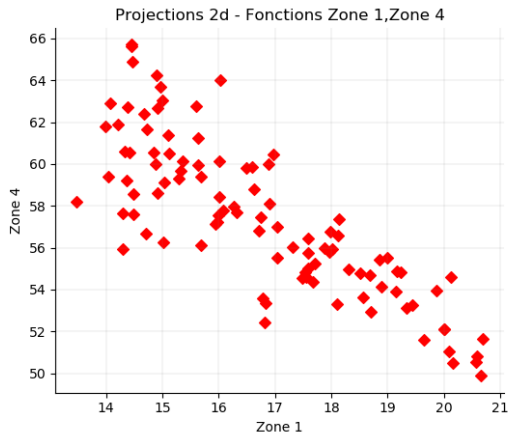
*45,5 kWh/m<sup>2</sup>/an à Ifrane      31,5 kWh/m<sup>2</sup>/an à Marrakech      55 kWh/m<sup>2</sup>/an à Errachidia*

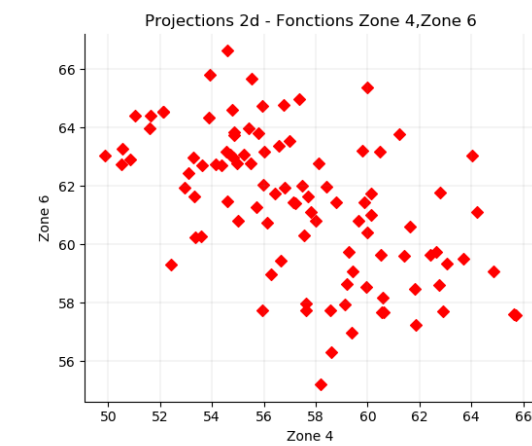
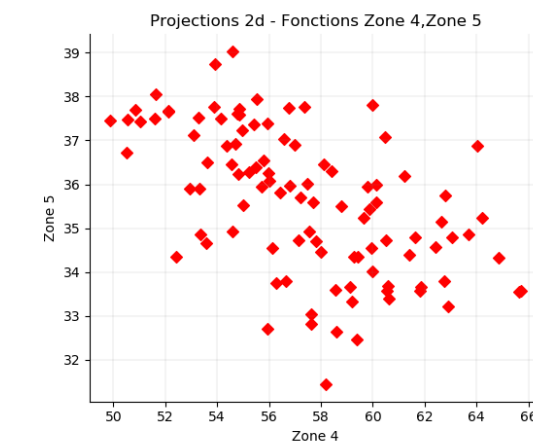
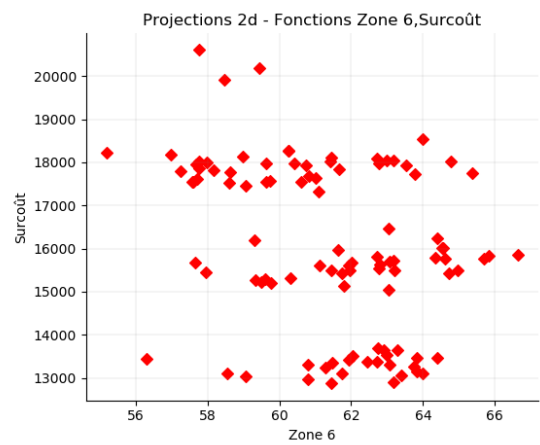
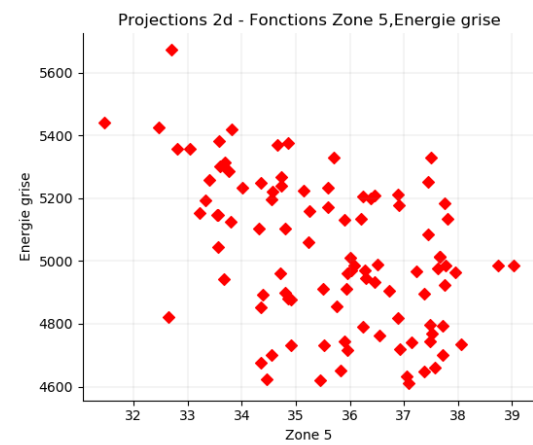
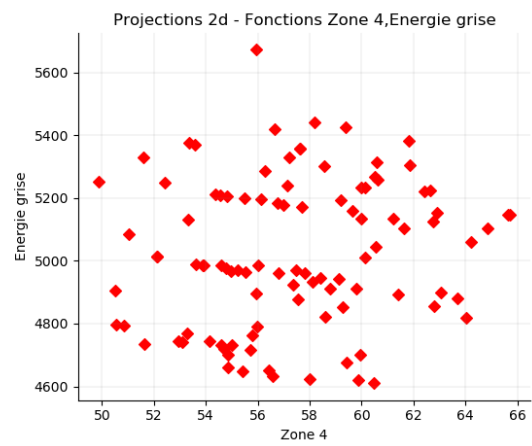
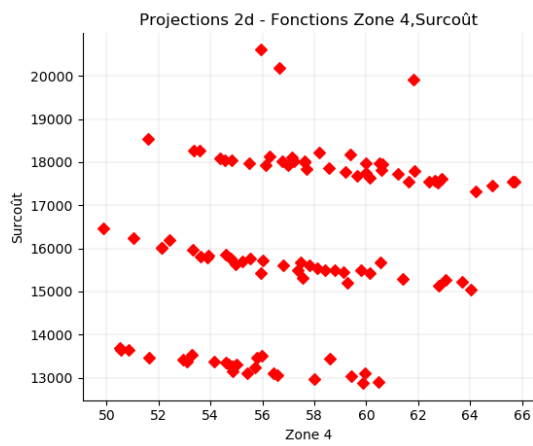
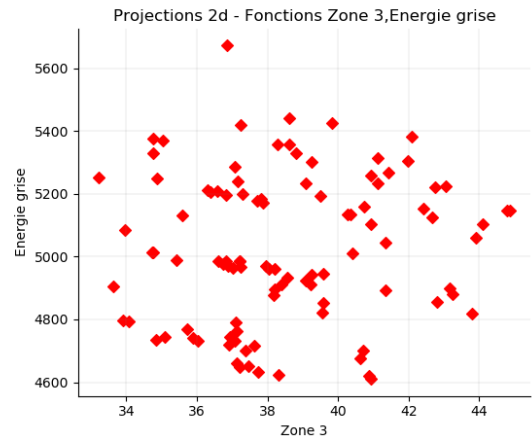
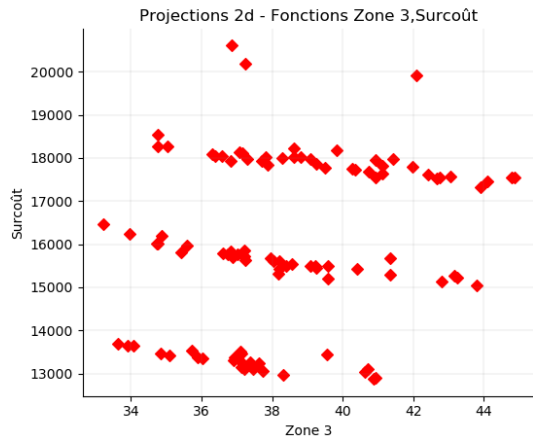
Les résultats obtenus respectent les contraintes imposées à l'optimisation.

La figure ci-dessous donne la projection 2D des 100 résultats du dernier tour d'optimisation :









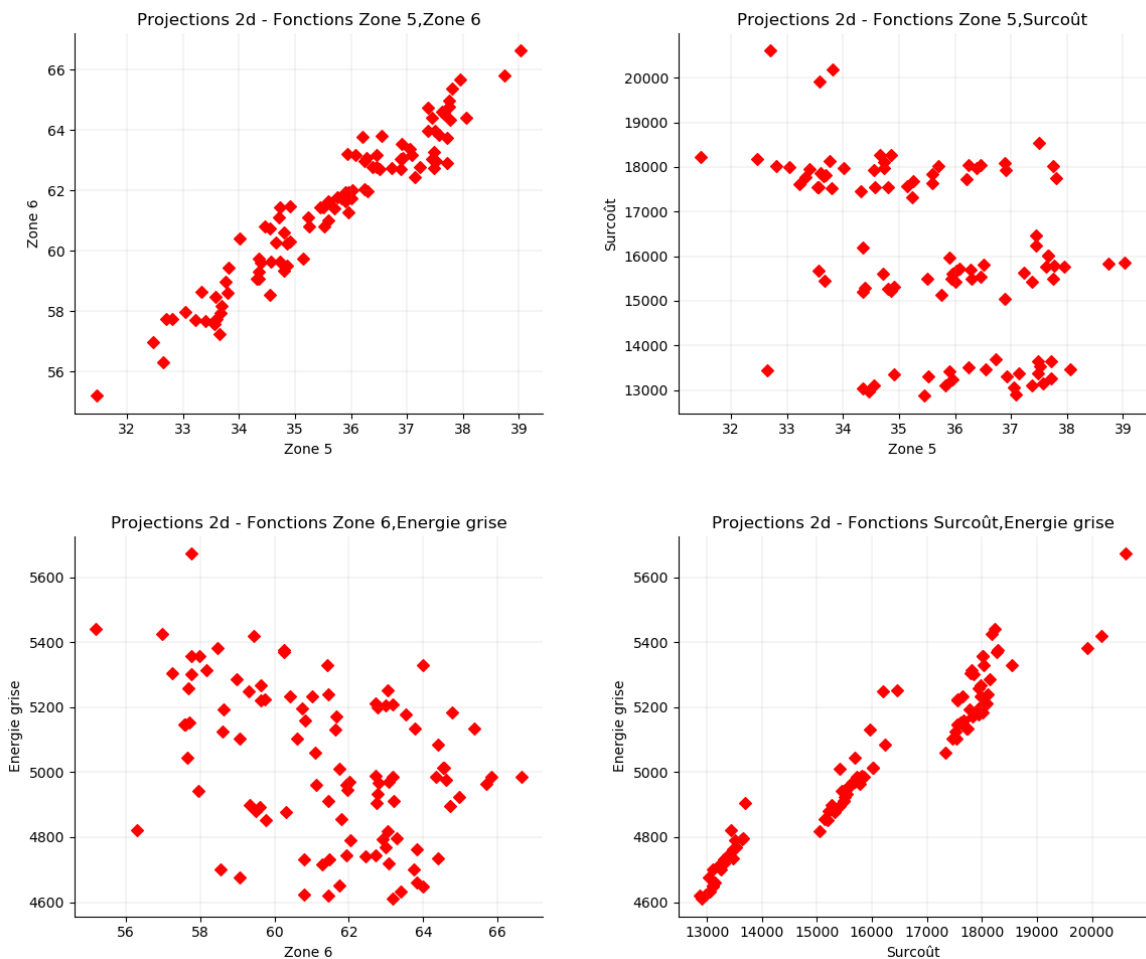
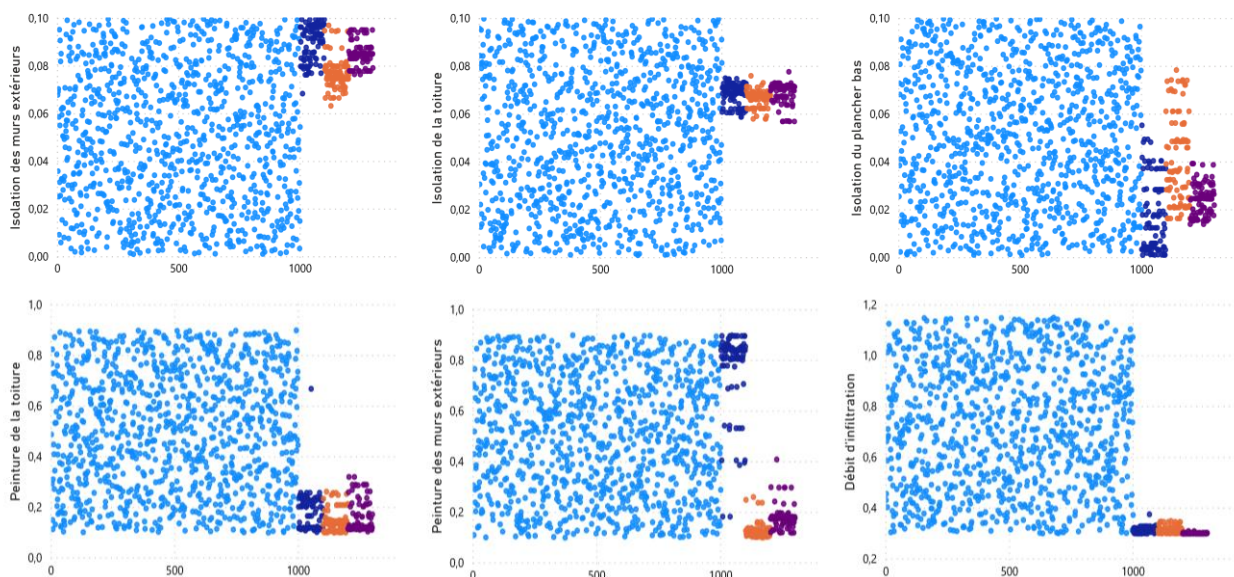


Figure 4-37 - Projection 2D des résultats

Les deux zones avec les besoins les plus importants sont la zone 4 (Ifrane) et la zone 6 (Errachidia). Les deux zones avec des excellentes performances énergétiques sont la zone 1 (Agadir) et la zone 2 (Tanger).

La figure ci-dessous donne la valeur de chaque paramètre par itération.



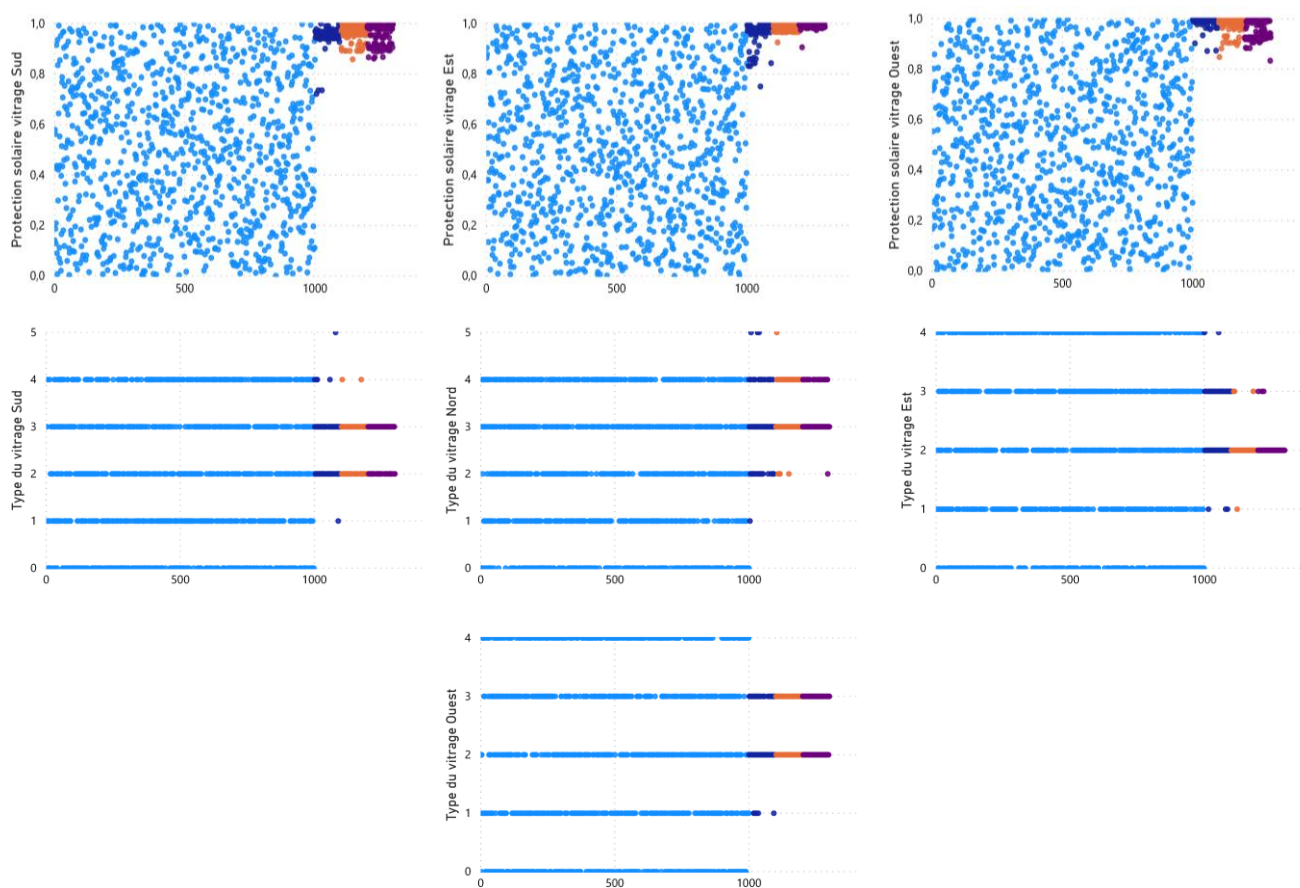


Figure 4-38 - Valeurs des paramètres d'entrée dans les combinaisons étudiées

Nous remarquons que les solutions requièrent, comme prédit par les indices de sensibilité :

- Une isolation importante des murs extérieurs et de la toiture ;
- Une moyenne à faible isolation du plancher bas ;
- Des peintures claires pour la toiture et les murs extérieurs ;
- Un débit d'infiltration minimal ;
- Une utilisation systématique des protections solaires ;
- Une utilisation de vitrages performants, notamment pour la façade Nord (vitrages type 3 ou 4).

Nous remarquons que la mise en place de ces solutions permet d'être en conformité aux exigences performantielles de la réglementation thermique dans toutes les zones climatiques du Royaume.

Les combinaisons et paramètres qui minimisent chacune des fonctions sont donnés ci-dessous :

Tableau 4-7 - Combinaisons optimales pour les 8 critères

Combinaison	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Surcoût	Energie grise
<b>1208</b>	<b>13,5</b>	20,7	38,6	58,2	<b>31,4</b>	<b>55,2</b>	18224	5441
<b>1008</b>	16,9	<b>16,2</b>	<b>30,4</b>	48,7	32,8	57,6	20601	5816
<b>1049</b>	30,1	23,2	34,4	<b>45,5</b>	46,9	71,1	14399	5083
<b>309</b>	96,9	136,3	196,5	251,3	153,1	210,1	<b>6341</b>	<b>1527</b>

Les valeurs des paramètres pour les trois combinaisons performantes sont :

Tableau 4-8 - Valeur des inputs des combinaisons optimales

Combinaison	Combinaison 1208	1008	1049
<i>Isolation des murs extérieurs</i>	0,10	0,08	0,10
<i>Isolation de la toiture</i>	0,07	0,07	0,07
<i>Isolation du plancher bas</i>	0,02	0,05	0,04
<i>Peinture des murs extérieurs</i>	0,18	0,18	0,84
<i>Peinture de la toiture</i>	0,12	0,12	0,12
<i>Débit d'infiltration</i>	0,3	0,3	0,3
<i>Protection solaire vitrage Sud</i>	99%	96%	97%
<i>Protection solaire vitrage Est</i>	100%	97%	99%
<i>Protection solaire vitrage Ouest</i>	97%	99%	99%
<i>Type du vitrage Sud</i>	3	4	2
<i>Type du vitrage Nord</i>	4	5	4
<i>Type du vitrage Est</i>	2	3	2
<i>Type du vitrage Ouest</i>	3	2	2

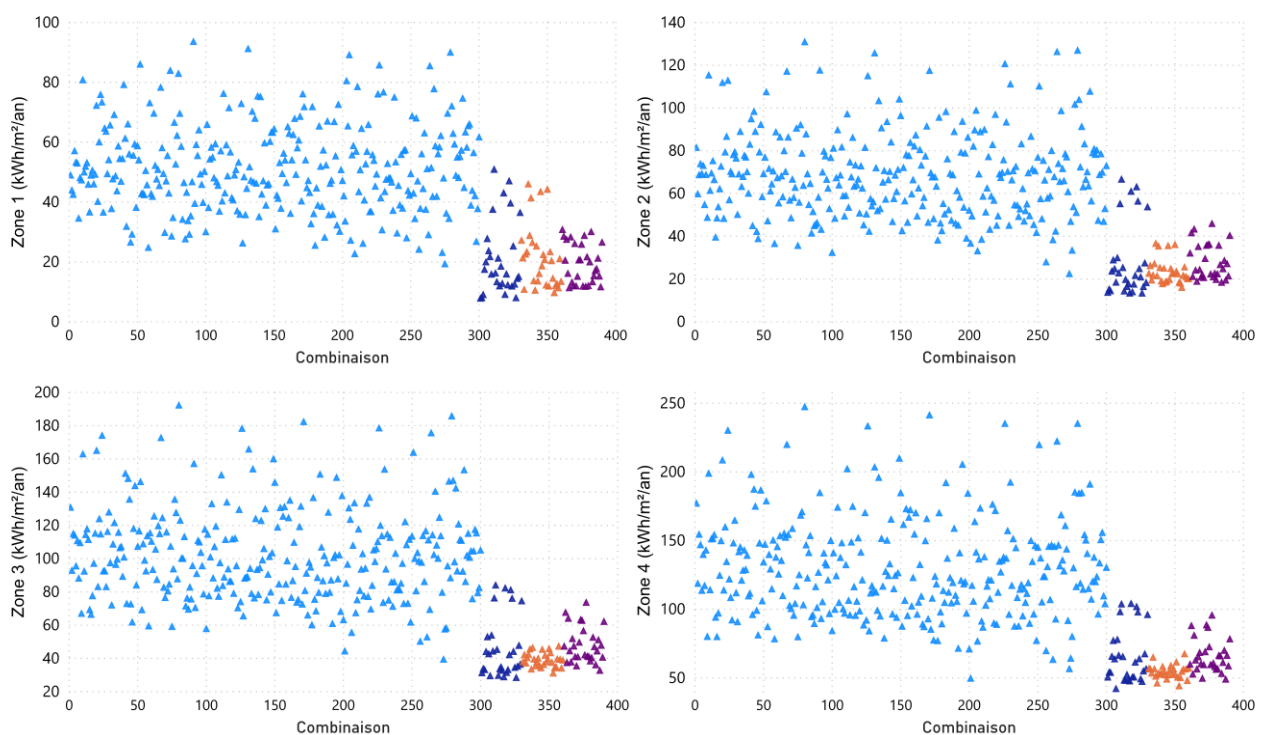
Pour les zones 1, 5 et 6 l'isolation du plancher bas est minimale. On pourrait ne pas isoler cette paroi, contrairement à ce qui est préconisé par la réglementation thermique pour les zones 5 et 6.

La peinture des murs extérieurs est forcée pour la combinaison optimale de la zone 4. Ceci est en parfait accord avec les préconisations de l'analyse de sensibilité.

### 7.3.2. Plan LHS à 300 échantillons

Nous présentons les valeurs des fonctions étudiées avec les trois tours d'optimisation, avec un échantillonnage type LHS plus réduit (300 échantillons).

Les résultats sont donnés ci-dessous pour les six fonctions énergétiques.



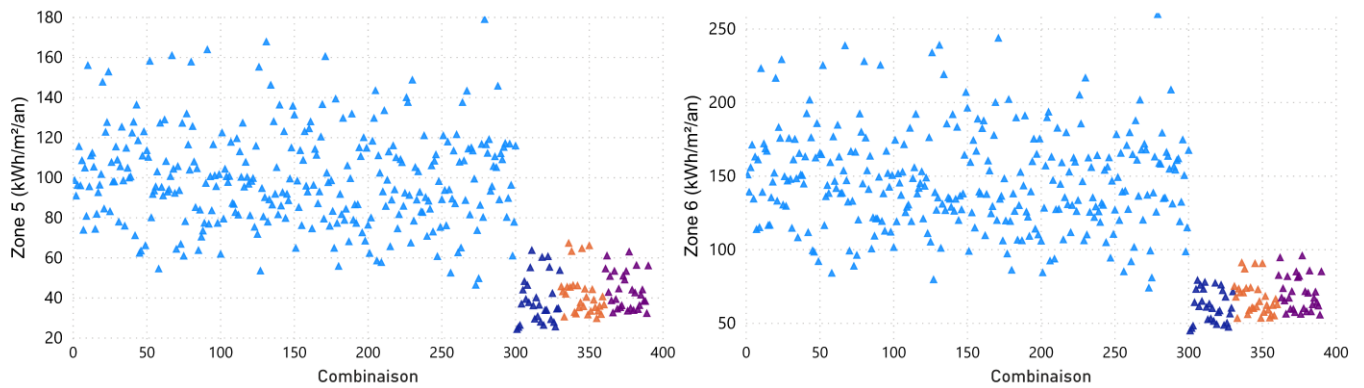


Figure 4-39 - Résultats d'optimisation avec un plan LHS de 300 combinaisons

Nous remarquons qu'un plan d'expérience avec une population assez limitée (300 combinaisons) permet, avec cette nouvelle méthode, d'avoir des bons résultats au problème d'optimisation multicritère.

Vu le faible nombre des combinaisons pour construire le modèle de régression, une partie des solutions obtenues par la métamodélisation s'éloigne un peu des résultats TRNSYS.

Cependant, les solutions non-dominées retenues à la fin de l'optimisation répondent aux contraintes et sont d'excellentes solutions à notre problème étudié.

## CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre un exemple complexe d'application des fonctionnalités de l'outil SAMOT dans la conception des bâtiments à haute efficacité énergétique.

En effet, nous avons choisi un modèle complexe, avec 13 paramètres d'entrée (continus et discrets) et 5 fonctions étudiées. L'utilisation de SAMOT nous a permis de comprendre, d'analyser et d'optimiser les modèles étudiés.

Pour l'analyse de sensibilité, nous avons déterminé le nombre de simulation minimal à choisir afin d'obtenir des bons résultats, pour les méthodes de Sobol (la plus coûteuse en temps de calcul mais la plus intéressante), de Morris (méthode d'analyse de sensibilité locale moins coûteuse en nombre d'itérations) et la méthode rapide « *Delta Moment Independant Mesure* » avec des échantillonnages type LHS.

Les techniques d'analyse de sensibilité nous ont permis de bien comprendre nos modèles étudiés, l'impact et la hiérarchisation des paramètres d'entrée sur les fonctions étudiées.

Nous avons ensuite décrit deux méthodologies d'optimisation qui présentent à la fois des avantages et des inconvénients ; Premièrement, la méthode d'optimisation par algorithmes génétiques directement sur TRNSYS, méthode précise mais très coûteuse en temps de calcul et deuxièmement la méthode d'optimisation par métamodélisation, qui consiste à réaliser des régressions polynomiales pour modéliser les fonctions étudiées via des polynômes et ensuite les optimiser par des algorithmes génétiques. Cette méthode a l'avantage d'être rapide, mais avec un risque de non-précision des prédictions.

Nous avons ainsi proposé dans le cadre ce travail, une méthode qui conjugue les avantages des deux techniques d'optimisation directe et par régression ; Cette méthode innovante nous a permis, à travers un exemple d'optimisation complexe à 8 critères avec contraintes, d'avoir de très bons résultats avec un temps de calcul très réduit.

Cette méthodologie est implémentée dans l'outil SAMOT développé par l'université Hassan 1<sup>er</sup> et mise à disposition des utilisateurs de TRNSYS.



## CONCLUSION GENERALE

Le sujet de ce travail de thèse s'inscrit dans la démarche de résolution de la problématique mondiale de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment, secteur le plus énergivore et le plus émetteur des gaz à effet de serre. Ainsi, nous avons développé l'outil *Sensitivity Analysis & Multiobjective Optimization Tool (SAMOT)* pour la conception des bâtiments à haute efficacité énergétique, afin de faciliter l'aide à la décision dès les phases amont des projets de construction des bâtiments. L'utilisation du langage de programmation Opensource *Python* a été privilégiée pour la disponibilité et la gratuité de ses librairies. Le choix du logiciel de simulation thermique dynamique *TRNSYS*, largement utilisé au niveau mondial dans les travaux de recherche dans le domaine énergétique, a également été préconisé. Notre problématique initiale était la généralisation et la facilitation de l'utilisation des logiciels de simulation thermique dynamique pour concevoir des bâtiments à haute efficacité énergétiques au Maroc. L'état de l'art manquait d'outils d'appréhension du comportement des bâtiments modélisés sur ces logiciels, et également de moyens efficaces pour choisir les solutions de construction performantes, sur un large panel de critères possibles (énergétiques, économiques, environnementaux etc.) et de données d'entrée (matériaux, données climatiques, contraintes architecturales, modes de construction etc.).

Dans ce sens, à travers le premier article que nous avons publié « *Application of sensitivity analysis and Genopt to optimize the energy performance of a building in Morocco* », nous avons démontré l'intérêt des méthodologies d'analyse de sensibilité, très peu utilisées dans l'état de l'art de l'efficacité énergétique. Cette méthode nous a permis de bien cerner le comportement de notre bâtiment modèle, vis-à-vis de la variation de ses paramètres d'entrée, ainsi que de classer l'impact de ces derniers sur les fonctions étudiées, et d'en négliger ceux avec des effets élémentaires. Par conséquent, sur 16 paramètres d'entrée étudiés, nous n'avons retenu que 9 paramètres pour optimiser les besoins de chauffage et de climatisation de notre bâtiment. Cette simplification du modèle nous a permis d'avoir des bons résultats avec un temps de calcul moindre. En plus, l'analyse de sensibilité a démontré que parmi les 13 paramètres d'entrée, l'isolation de la toiture est celui avec la plus grande influence sur les besoins énergétiques de notre bâtiment modèle.

Dans notre deuxième article « *Multiobjective Optimization of a Family House Performance and Forecast of its Energy Needs by 2100* » nous nous sommes penchés sur la problématique d'optimisation multicritère, en élargissant nos fonctions à l'optimisation des performances économiques (surcoût d'investissement) et environnementales (énergie grise) du bâtiment modèle. Pour ce faire, nous avons interfacé le logiciel *TRNSYS* à l'outil d'optimisation « *MOBO* ». Nous avons constaté que cet outil donne des bons résultats, mais ne fournit pas à ses utilisateurs ni la flexibilité demandée ni les données de sortie souhaitées.

Ainsi, dans le 3<sup>ème</sup> article intitulé « *An Innovative Multicriteria Decision-Making Tool for Building Performance Optimization* », nous avons développé l'outil Opensource *SAMOT* sur *Python*, intégrant les outils d'analyse de sensibilité, d'optimisation multicritère, et nous avons

introduit la régression polynomiale pour modéliser les fonctions de TRNSYS par des modèles polynomiaux. Nous avons appliqué l'outil pour étudier le comportement du bâtiment modèle en intégrant les effets du réchauffement climatique. Un problème d'optimisation de 5 critères a ainsi été abordé et résolu.

En effet, le bâtiment initialement choisi est très énergivore, avec un besoin de chauffage et de climatisation égal à  $185 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . Ce bâtiment modèle, composé de paramètres de parois extérieures les plus utilisées au Maroc, n'est pas conforme aux exigences réglementaires. Nous avons réussi, grâce à l'outil SAMOT et à l'utilisation de deux méthodologies d'optimisation : 1<sup>ère</sup> méthode directe (précise mais coûteuse en temps de calcul) et une 2<sup>ème</sup> méthode basée sur la régression polynomiale (rapide mais avec un risque de non-précision des prédictions) d'obtenir un bâtiment performant sur tout son cycle de vie (avec les scénarios 2050 et 2100 du réchauffement climatique). En plus, nous avons démontré que le modèle polynomial d'ordre 2 avec interactions est le plus adapté dans notre cas d'étude pour modéliser les fonctions de TRNSYS. Ce modèle a permis d'avoir un bon coefficient de corrélation et une faible erreur moyenne absolue.

Dans notre 4<sup>ème</sup> article « *Innovative time efficient method to optimize buildings' performance using Design of Experiment, Polynomial Regression and Genetic Algorithms* » nous avons introduit une nouvelle méthodologie d'optimisation multicritère, qui combine les forces de la simulation thermique dynamique, des algorithmes génétiques et de la régression polynomiale par les techniques de réseaux de neurones artificiels. Cette nouvelle méthodologie, rapide et précise, nous a permis de résoudre un problème d'optimisation complexe de 13 paramètres d'entrée, 8 objectifs et 6 contraintes correspondant aux contraintes de la réglementation thermique marocaine. Nous avons ainsi réussi, avec un plan d'expérience de 300 combinaisons uniquement et avec 3 tours d'optimisation, d'obtenir un bâtiment conforme aux exigences réglementaires des différentes zones climatiques marocaines et avec des bonnes performances économique et environnementale. Cette méthodologie permettra aux concepteurs des bâtiments d'avoir un bon compromis entre la qualité des résultats et le temps de calcul nécessaire. Le bâtiment avec initialement des besoins énergétiques de  $185 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  à Settat donne des performances de  $13,4 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  à Agadir (zone climatique 1),  $16,21 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  à Tanger (zone 2),  $30,4 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  à Fès (zone 3),  $45,5 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  à Ifrane (zone 4),  $31,5 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  à Marrakech (zone 5) et  $55 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  à Errachidia (zone 6). Notre bâtiment nécessite le plus de besoins énergétiques à Errachidia et puis à Ifrane, et le moins de besoins à la zone d'Agadir. Ce constat est en parfaite concordance avec le classement décroissant des contraintes énergétiques par zone de la réglementation thermique marocaine.

L'ensemble de ces travaux de recherche permettent d'apporter des réponses efficaces et pertinentes à la problématique initiale, et de simplifier le déploiement de l'efficacité énergétique dans le secteur bâtiments, ainsi que de faciliter l'aide à la décision.

Pour généraliser l'utilisation de ces outils au deuxième pilier de résolution de la problématique énergétique mondiale, à savoir les énergies renouvelables, nous avons appliqué nos méthodologies sur un cas de mise en place de panneaux solaires hybrides photovoltaïques-thermiques dans l'article « *Technical & economical assessment of a hybrid PV thermal system in Morocco* » et d'un panneau solaire photovoltaïque et une installation éolienne domestique

dans l'article « *Technical Assessment of a Photovoltaic Panel and a Wind Domestic Turbine Systems in Morocco* ». Les logiciels de simulation thermique dynamique permettent en effet d'étudier également ces systèmes. Nos méthodologies d'analyses de sensibilité et d'optimisation ont permis de mieux cerner ces technologies ainsi que d'optimiser leurs performances dans plusieurs villes du royaume.

SAMOT permet alors de répondre aux problématiques d'efficacité énergétique dans le bâtiment et également des énergies renouvelables, afin d'aider les chercheurs, ingénieurs et décideurs à concevoir des systèmes et des bâtiments performants.

Le présent manuscrit a repris l'essentiel des résultats de ces travaux de recherche, en les décrivant au long de ses 4 chapitres.

En termes de perspectives, le choix de notre bâtiment modèle a été fait pour faciliter sa mise en œuvre pour un travail expérimental (bâtiment carré de faible superficie). Une suite de ce travail serait alors de vérifier, expérimentalement, les résultats obtenus par les différents outils de modélisation.

Les outils développés permettraient également d'étudier un panel plus large de paramètres d'entrée ou de fonctions objectif, en incluant par exemple les systèmes, les modes de ventilation, d'autres types de matériaux (à changement de phase par exemple), des planchers chauffants etc. L'outil et les méthodologies peuvent de même être appliqués pour l'étude du potentiel de la réhabilitation des bâtiments existants au Maroc, dans le but de rendre l'ensemble du parc existant plus performant énergétiquement, dans l'absence d'une réglementation dans la matière.

## Travaux de recherche

- **Abdelhadi SERBOUTI**, Mourad RATTAL, El Mostafa OUALIM, Azeddine MOUHSEN, “*Innovative Multicriteria Decision-Making Tool for Building Performance Optimization*”, ETASR (Engineering, Technology & Applied Science Research), <https://doi.org/10.48084/etasr.3953>
- **Abdelhadi SERBOUTI**, Mourad RATTAL, El Mostafa OUALIM, Azeddine MOUHSEN, “*Innovative time efficient method to optimize buildings’ performance using Design of Experiment, Polynomial Regression and Genetic Algorithms*”, Journal of Physics CP, doi:10.1088/1742-6596/1714/1/012014
- **Abdelhadi SERBOUTI**, Mourad RATTAL, Boulal Abdellah, El Mostafa OUALIM, Azeddine MOUHSEN, “*Multi-objective optimization of a family house performance and forecast of its energy needs by 2100*”, International Journal of Engineering and Technology (IJET) Vol 7 (4.32) (2018) pp: 7-10
- **Abdelhadi SERBOUTI**, Mourad RATTAL, Boulal Abdellah, Mohammed HARMOUCHI, Azeddine MOUHSEN, “*Application of sensitivity analysis and Genopt to optimize the energy performances of a building in the environment of Settat*”, International Journal of Engineering and Technology (IJET), Vol 7; No.4; pp: 2068-2074; 2018
- **Abdelhadi SERBOUTI**, Mourad RATTAL, Boulal Abdellah, El Mostafa OUALIM, Azeddine MOUHSEN, “*Technical & Economical Assessment of a Hybrid PV Thermal System in Morocco*”, AIP Conference Proceedings 2056, 020002 (2018)
- **Abdelhadi SERBOUTI**, Mourad RATTAL, Boulal Abdellah, El Mostafa OUALIM, Azeddine MOUHSEN, “*Technical Assessment of a Photovoltaic Panel and a Wind Domestic Turbine Systems in Morocco*”, European Journal of Molecular & Clinical Medicine 2020, Volume 7, Issue 3, Pages 443-452

## Bibliographie

---

1. IREA, International Renewable Energy Agency. *TRANSFORMATION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE, Une feuille de route pour 2050*.
2. BP. *BP Statistical Review of World Energy, 67th Edition, June 2018*. 2018.
3. *Bilan Mondial 2018, Vers un secteur des bâtiments et de la construction à émission zéro, efficace et résilient*. 2018.
4. Balances, World Energy Statistics and. *Calculs dérivés 2018*. s.l. : AIE Energy Technology Perspectives buildings model, 2018.
5. ADEME. *Climat, Air et Energie - Chiffres clés*. 2014.
6. BIRD-IDA. La banque mondiale. [En ligne] 2015. <http://projects.worldbank.org>.
7. La Banque mondiale. *Émissions de CO<sub>2</sub> - Morocco*. [En ligne] 2017. [Citation : 08 Mars 2021.] <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EN.ATM.CO2E.PC?locations=MA>.
8. Lahlou, Naim. *Energie, changement climatique et bâtiment en Méditerranée, Plan Bleu Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM*. s.l. : Sophia Antipolis , 2011.
9. La situation énergétique du Maroc analysée par l'AIE. *Connaissance des énergies*. [En ligne] 2019. <https://www.connaissancedesenergies.org/la-situation-energetique-du-maroc-decryptee-par-laie-190516#:~:text=Malgr%C3%A9%20ces%20C%AB%20efforts%20positifs%20C%BB%2C,l'Agence%20po rtant%20sur%202017..>
10. Plan, Haut Commissariat au. *Prospective énergétique du Maroc - Enjeux et défis*. 2018.
11. Plan, Haut-commissariat au. *le Maroc en Chiffres*. 2019.
12. ADEREE. *Règlement Thermique de Construction au Maroc (RTCM)*. s.l. : Agence Nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique, 2014.
13. (ONDH), O bservatoire National du Développement Humain. *Enquête panel de ménages 2017*. 2017.
14. ADEREE. *Guide technique de l'isolation thermique*.
15. plan, Haut-commissariat au. *L'HABITAT AU MAROC : SITUATION DU PARC DE LOGEMENTS ET STATUT D'OCCUPATION*. 2014.
16. BLERVAQUE, Hubert. *Règles de modélisation des systèmes énergétiques dans les Bâtiments Basse Consommation, pp. 201. Thèse de doctorat, Spécialité « Énergétique »*. s.l. : MINES ParisTech Centre Efficacité énergétique des Systèmes, 2014.
17. e-rt2012. Explication-architecture-bioclimatique. [En ligne] 2019. <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/>.
18. RT-batiment. Présentation générale dispositif RT existant. *RT-batiment*. [En ligne] 2019. <https://www.rt-batiment.fr/batiments-existants/rt-existant-dispositif-general/presentation-generale-dispositif.html>.
19. RT2020. Réglementation thermique 2020. [En ligne] 2019. <http://www.rt-2020.com/>.
20. Sacha Alberici, Sil Boeve, Pieter van Breevoort, Yvonne Deng, Sonja Förster, Ann Gardiner, Valenijn van Gastel Katharina Grave, Heleen Groenenberg, David de Jager, Erik Klaassen, Willemijn Pouwels, Matthew Smith, Erika de Visser, Tomas Winkel, Karlien Wou. *Subsidies and costs of EU Energy, Final report*. : s.n., 2014.
21. David LEBANNIER, Santhiah SHANTHIRABALAN, Ulrich ROCHARD, Coralie RUFFENACH. *Etude comparative des réglementations thermiques des bâtiments et labels à l'échelle européenne, RAPPORT FINAL Version finale*. 2015.

22. CHEOPS: a simplified tool for thermal assessment of Mediterranean residential buildings in hot and cold seasons. Ghrab-MORCOS, N. 2005, Energy Build., vol. 37, no 6, pp. p. 651-662.
23. DTR. *DTR C3-2 Fascicule 1, Réglementation thermique des bâtiments d'habitation - règles de calcul des déperditions calorifiques*. 1997.
24. OSMAN, NEJIB. *Tunisie : une politique nationale d'efficacité énergétique* . 2012.
25. BO. *Bulletin officiel n°6306 le 06 novembre 2014*. s.l. : <http://www.mem.gov.ma/SitePages/TestesReglementaires/BORegtherm.pdf>, 2014.
26. conseils xpair. [En ligne] [Citation : 15 07 2020.] [https://conseils.xpair.com/actualite\\_experts/simulation-thermique-dynamique.htm](https://conseils.xpair.com/actualite_experts/simulation-thermique-dynamique.htm).
27. Spitz, Clara. *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments*. s.l. : Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENA004. tel-00768506, 2012.
28. APOGEE, ASSOCIATION. *Revue pratique des logiciels de simulation énergétique dynamique (SED)*. 2015.
29. Idchabani, Rachida. *Contribution à l'efficacité énergétique du bâtiment résidentiel au Maroc, modélisation et optimisation de l'isolation thermique*. 2014.
30. *Dynamic building simulations for the establishment of a Moroccan thermal regulation for buildings* . SICK, Friedrich, SCHADE, Stefan, MOURTADA, Adel, UH, Dieter et GRAUSAM, Michael. 2014, Journal of Green Building, pp. 1 avril 2014. Vol. 9, n° 1, p. 145-16.
31. CSTB. Logiciels CSTB. *CSTB*. [En ligne] 2019. <https://logiciels.cstb.fr/batiments-et-villes-durables/performances-energetiques/meteonorm>.
32. AREA, BET. *Etude sur l'état des lieux, typologie & évolution du parc bâti au Maroc dans l'optique de la mise en application du code d'efficacité énergétique - Rapport de synthèse générale* . 2012.
33. sites.uclouvain. [En ligne] [Citation : 01 07 2020.] [https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide\\_sources.htm](https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_sources.htm).
34. Bodart, Magali. *Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique* . s.l. : Faculté des Sciences Appliquées Unité d'Architecture, 2002.
35. *Programme National d'Efficacité Énergétique dans le Bâtiment, Réunion de concertation avec le Ministère de l'habitat sur les éléments techniques de la réglementation thermique dans le secteur de l'habitat au Maroc*. ADEREE. 2010. procès-verbal du 30 Septembre 2010.
36. *Influence of Absorptance in the Building Envelope of Affordable Housing in Warm Dry Climates*. ALPUCHE, María G., GONZÁLEZ, Ileana, OCHOA, José M., MARINCIC, Irene, DUARTE, Alejandro et VALDENEBRO, Esaiy. 2014, Energy Procedia, pp. Vol. 57, p. 1842-.
37. SYSTEM, ABSOLU. *Guide pratique couleurs en extérieur - SOLUTIONS & RECOMMANDATIONS*.
38. *Thermal and economic windows design for different climate zones*. Jaber, S., & Ajib, S. 2011, Energy and Buildings, pp. 43(11), 3208-3215. doi:10.1016/j.enbuild.2011.08.019.
39. *Analysis of different models to estimate energy savings related to windows in residential buildings* . Urbikain, M. K., & Sala, J. M. 2009, Energy and Buildings, pp. 41(6), 687-695. doi:10.1016/j.enbuild.2009.01.007.
40. LIÉBARD, Alain et HERDE, André De. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable* . Paris : Le Moniteur Editions. ISBN 978-2-281-19290-2, 2006.
41. Zirnheld, H. *Using calibrated simulation to quantify the energy savings from residential passive solar design in Canada* . Toronto : ON: Ryerson University, 2013.
42. CETEMCO. *AZEL, Guide technique* . 2018.

43. *Réunion de la Commission des investissements*. s.l. : Ministère de l'Industrie, de l'Investissement, du Commerce et de l'Economie Numérique, 2018.
44. Construction, Fédération des Industries de Matériaux de. *FIMC*. 2012.
45. ADEREE. *9 modèles de construction efficace au Maroc*. s.l. : Agence Nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique.
46. ELAMIN, MOUBARK YOUSIF MOHAMMED. *Contribution à l'évaluation énergétique des bâtiments au nord du Maroc*. Tanger : s.n., 2014.
47. *REVUE SUR L'ANALYSE DE SENSIBILITE GLOBALE*. Iooss. 2010.
48. *Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques*. Iooss. 2011.
49. *Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications*. Song, X., et al. 2015, Journal of hydrology, , Vol. 523, pp. 739- 757.
50. Saltelli A, Ratto M, Andres T, Campolongo F, Cariboni J, Gatelli D, Saiana M, Tarantola. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. s.l. : John Wiley&Sons, Ltd, 2008.
51. Mexico, École Chercheur. *Analyse de sensibilité: mesure de l'importance des facteurs par décomposition de la variance*. 2010.
52. *Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates*. Sobol, I.M. 2001, Mathematics and Computers in Simulation, pp. Volume 55, Issues 1-3, 15 February 2001, Pages 271-280.
53. *A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis*, . A. T. Nguyen, S. Reiter, P. Rigo. 2014, Applied Energy, pp. Applied Energy 113 (2014) 1043-1058.
54. Bäck, T. *Evolutionary Computation*, Oxford Press, New York. 1996.
55. WHITLEY, D. *An executable model of a simple genetic algorithm*, *Foundations of Genetic Algorithms 2*. 1993.
56. Gratton, S. *Analyse matricielle et Optimisation*. s.l. : Ed. Ress. Pédag. Ouv. INPT, 0727 (2014), 2014.
57. FILFLI, Sila. *Optimisation bâtiment/système pour minimiser les consommations dues à la climatisation*. Paris : École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
58. 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*. La Rochelle : Université de La Rochelle, 2015.
59. JAFFAL, Issa. *Vers une conception rationnelle des bâtiments à basse consommation d'énergie : méthodologie d'évaluation des performances thermiques*. La Rochelle : s.n., 2009.
60. Coustaroux, Marjory. *Analyse de sensibilité et planification d'expériences*. Toulouse : INSA Toulouse, 2012/2013.
61. Ruch, Jean-Jacques. *REGRESSION LINEAIRE*. s.l. : BORDEAUX I, 2013 - 2014.
62. Wasserman. *Chapitre 13 p. 40*. s.l. : Gelman et Hill , 2004.
63. Andrew Gelman, Guido Imbens. *Why High-Order Polynomials Should Not be Used in Regression Discontinuity Designs*. 2014.
64. *MOBO A NEW SOFTWARE FOR MULTI-OBJECTIVE BUILDING PERFORMANCE OPTIMIZATION*, *Proceedings of BS2013 / 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28*. Matti Palonen, Mohamed Hamdy, and Ala Hasan. Chambéry, France : s.n., 2013. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association.
65. Laboratory, Lawrence Berkeley National. GENOPT, Generic Optimization Program. [En ligne] 2019. Simulationresearch.lbl.gov/GO.
66. *Ensuring desired natural ventilation rate by means of optimized openings*. Louis Stephan, Alain Bastide, Etienne Wurtz and Bernard Souyri. Glasgow, Scotland : s.n., July 2009. 11-th IBPSA Conference.

67. *Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations.*, 37(6):603-612, 2005. Polak, Michael Wetter and Elijah. 2005, Energy and Buildings, pp. Energy and Buildings 37(6):603-612, 2005.
68. Serbouti, Abdelhadi & Rattal, Mourad & Abdellah, Boulal & Harmouchi, Mohammed & Mouhsen, Azeddine. Application of sensitivity analysis and genopt to optimize the energy performance of a building in Morocco. 2018, pp. 7. 2068-2074. 10.14419/ijet.v7i4.13280.
69. *Multi-Objective Optimization of a Family House Performance and Forecast of its Energy Needs by 2100.* Serbouti, Abdelhadi & Rattal, Mourad & Abdellah, Boulal & Oualim, El & Mouhsen, Azeddine. s.l. : International Journal of Engineering and Technology IJET, 2018. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.32.23235.
70. Herman, J. and Usher, W. SALib: An open-source Python library for sensitivity analysis. *Journal of Open Source Software*. 2017, p. 2(9). doi:10.21105/joss.00097.
71. *Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices.* Saltelli, Andrea. 2002, Computer Physics Communications, pp. Volume 145, Issue 2, 15 May 2002, Pages 280-297.
72. *Derivative based global sensitivity measures and their link with global sensitivity indices.* I.M.Sobol, S.Kucherenko. 2009, Mathematics and Computers in Simulation, pp. Volume 79, Issue 10, June 2009, Pages 3009-3017.
73. Platypus, A Free and Open Source Python Library for Multiobjective Optimization. *GITHUB*. [En ligne] 2019. <https://github.com/Project-Platypus>.
74. Baudin, Michael. pyDOE: The experimental design package for python. *pythonhosted*. [En ligne] 2013. <https://pythonhosted.org/pyDOE/>.
75. Hunter, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*. 2007, pp. vol. 9, no. 3, pp. 90-95.
76. *Scikit-learn: Machine Learning in Python.* al., Pedregosa et. 2011, JMLR 12, pp. pp. 2825-2830.
77. Tkinter. *docs python*. [En ligne] 2020. <https://docs.python.org/3/library/tk.html>.
78. Team, PyInstaller Development. pyinstaller. [En ligne] 2020. <https://www.pyinstaller.org/>.
79. AMEE. *Propriétés thermo-physiques des matériaux locaux de construction au Maroc*. 2019.
80. Revelle, R., and H. Suess. «Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> during the past decades » . s.l. : Tellus 9, 18-27 [archive] (1957), 1957.
81. Jean-Claude Bernier, Guy Brasseur, Yves Bréchet, Sébastien Candell, Anny Cazenave, Vincent Courtillot, Marc Fontecave, Emmanuel Garnier, Philippe Gœbel, Jack Legrand, Michel Legrand, Hervé Le Treut, Pascal Mauberger. *Chimie et changement climatique*. s.l. : EDP Sciences, 2016.
82. IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. [En ligne] 2014. <https://www.ipcc.ch>.
83. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.). *Technical summary. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* . s.l. : Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 35-94, 2014.
84. CCPI. *Climate Change Performance Index*. [En ligne] 2019. <https://www.climate-change-performance-index.org/>.
85. Germanwatch. *Climate Change Performance Index, results 2019*. s.l. : NewClimate Institute & Climate Action Network, 2019.
86. Al, Jean-Claude Bernier et. *Chimie et changement climatique*. s.l. : Collectif, 2016.
87. Issam, Sobhy. *Modélisation dynamique d'un bâtiment résidentiel à Marrakech et propositions pour améliorer ses performances énergétiques* . Marrakech - Maroc : Université Cadi Ayyad, 2017.
88. TRNSYS. *Multizone Building modeling, Volume 6*. s.l. : Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison, 2007.



89. *Ground Heat Exchangers A review of Systems, Models and Applications*. Kalogirou, G. Florides and S. 2007, *Renewable Energy* Vol 32 N 15, p. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>.
90. *Comportement thermique de la terre stabilisée au ciment*. Boussaid, S., El Bakkouri, A., Ezbakhe, H., Ajzoul, T., & El Bouardi, A. 2001, *Revue Française de Génie Civil*, pp. 5(4), 505-515. doi:10.1080/12795119.2001.9692320.
91. P Heiselberg, H Brohus, A Hesselholt, H Rasmussen, E Seinre et S Thomas. *Application of Sensitivity Analysis in Design of Sustainable Buildings* . Aalborg, Denmark : Department of Civil Engineering, Aalborg University, 2007.
92. *Effects of absorptance of external surfaces on heating and cooling loads of residential buildings in Jordan*. A. Shariah, B. Shalabi, A. Rousan, B. Tashtoush. 1998, *Energy Conversion and Management*, pp. 273-284.
93. *Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network*. Laurent Magnier, Fariborz Haghighat. 2010, *Building and Environment*, pp. 739-746.
94. *Effect of Building Orientation and Window Glazing on the Energy Consumption of HVAC System of an Office Building for Different Climate Zones*. Pai, Maya Yeshwanth. 2015, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, pp. Vol. 4 Issue 09, September-2015.
95. Ingenieros, CYPE. CYPE Ingenieros. [En ligne] 2019. <http://www.maroc.prix-construction.info>.
96. INIES. INIES. [En ligne] 2019. [www.base-inies.fr](http://www.base-inies.fr).
97. KBOB. Base de données KBOB. [En ligne] 2019. <https://www.kbob.admin.ch>.
98. EFFINERGIE. *Règles techniques applicables aux bâtiments faisant l'objet d'une demande de label Bepos-effinergie 2013*. 2013.
99. MAES, Pascale. *Labels d'efficacité énergétique : HQE, BBC-Effinergie, Maison Passive, RT 2005/2012, Qualitel*. Paris : Eyrolles. ISBN 978-2-212-12644-0, 2009.
100. *A Simplex Method for Function Minimization*. NELDER, J. A. et MEAD, R. 1965, *The Computer Journal*, pp. 1 janvier 1965. Vol. 7, n° 4, p. 308 313.
101. *Evaporative Cooling as an Efficient System in Mediterranean Region*. Samar Jaber, Salman Ajib. s.l. : Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2011, Vol. 31 (14-15), pp.2590.
102. (Eds.), Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart. *EMISSIONS SCENARIOS*. Cambridge University Press : IPCC, 2000 . pp 570.

## Liste des tableaux

---

Tableau 1-1 - Classement des catégories des logements par prix.....	20
Tableau 1-2 - Répartition des ménages selon le type du logement en 2004 et 2014.....	21
Tableau 1-3- Répartition des ménages selon le type de logement à la région du grand Casablanca en 2014..	21
Tableau 1-4- Etat de l'art des réglementations dans les pays de la Méditerranée.....	26
Tableau 1-5 - Résidentiel : spécifications techniques minimales kWh/m <sup>2</sup> /an.....	27
Tableau 2-1 - Irradiations globales par ville.....	37
Tableau 2-2- Caractéristiques des parois extérieures.....	50
Tableau 3-1 - Comparatif des outils d'optimisation.....	70
Tableau 3-2 - Choix de l'isolant en fonction de la paroi (42).....	80
Tableau 3-3 - Propriétés des isolants.....	80
Tableau 3-4- Isolants retenus.....	82
Tableau 3-5 - Propriétés des briques.....	82
Tableau 4-1- Résultats de l'analyse granulo-sédimentométrique des terres étudiées (90).....	90
Tableau 4-2 - Paramètres d'entrée.....	94
Tableau 4-3 - Prix et propriétés des vitrages.....	97
Tableau 4-4- Energie grise des solutions étudiées.....	98
Tableau 4-5 - Combinaisons optimales.....	113
Tableau 4-6 - Solutions optimales et comparaison avec TRNSYS.....	121
Tableau 4-7 - Combinaisons optimales pour les 8 critères.....	132
Tableau 4-8 - Valeur des inputs des combinaisons optimales.....	133

## Table des illustrations

<i>Figure 1-1- Evolution du mix énergétique mondial de 1992 à 2017 (2).....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 1-2- Mix énergétique par région en 2017 (2).....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 1-3- Répartition des consommations mondiale et des émissions des gaz à effet de serre par domaine (4).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 1-4- Répartition des évolutions des postes de consommation d'électricité en France (5).....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 1-5- Evolution des émissions du secteur du bâtiment entre 2010 et 2017 (4).....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 1-6- Evolution du PIB et de la population au Maroc depuis 1960 (6).....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 1-7- Consommation d'énergie primaire entre 2007 et 2017 (Mtep) (7)    Figure 1-8- Part de l'énergie importée au Maroc depuis 1971 (5).....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 1-9- Energie primaire - Consommations en 2017 (Mtep) (9).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 1-10- Consommation d'énergie primaire de source renouvelable (Eolien, solaire, Géothermie, Biomasse et déchets) au Maroc entre 2007 et 2017 (en Million de tonnes équivalent pétrole) (10).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 1-11- Evolution des émissions de dioxyde de carbone au Maroc entre 2007 et 2017 (Million de tonnes de dioxyde de carbone) (10).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 1-12- Répartition des émissions GES - Données banque mondiale pour l'année 2015 (7).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 1-13- Comparatif des émissions des GES (7).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 1-14- Consommations d'énergie par secteur au Maroc (12).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 1-15 - Part des dépenses des ménages marocains (13).....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 1-16 - Ryad marocain.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 1-17- Autorisations de construire en 2017 (11).....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 1-18 - Principes de base d'une conception bioclimatique (17).....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 2-1 - Zone climatique de la réglementation thermique marocaine (12) &amp; répartition du parc de logement par zone climatique.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 2-2 - Températures annuelles des villes de la zone 1.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 2-3 - Amplitude journalière en °C de la température ambiante à Settat.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 2-4- Températures annuelles des villes de la zone 2.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 2-5 - Températures annuelles des villes de la zone 3.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 2-6 - Températures annuelles des villes de la zone 4.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 2-7 - Températures ambiantes - Marrakech.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 2-8 - Températures ambiantes - Zone 6.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 2-9 - Rayonnements direct, global et diffus.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 2-10 - Irradiation solaire à Settat        Figure 2-11 - Irradiation solaire à Ouarzazate.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 2-12 - Besoins énergétiques spécifiques de chauffage et climatisation (12).....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 2-13 - Degrés-jours de chauffage et de climatisation par ville avec la méthode à pas horaire.....</i>	<i>39</i>

Figure 2-15- Degrés-heures de climatisation à Settat .....	40
Figure 2-14 - Degrés-heures de chauffage à Settat.....	40
Figure 2-16 - Coefficient d'absorption des surfaces peintes (37).....	41
Figure 2-17 - Facteur solaire des vitrages (RTCM).....	42
Figure 2-18 - Windows Type Manager sur TRNSYS.....	42
Figure 2-19 - Les défauts d'étanchéité des bâtiments (40).....	43
Figure 2-20 - Schéma de principe d'une ventilation simple flux.....	43
Figure 2-21 - Protections solaires et leurs facteurs solaires .....	44
Figure 2-22- Calcul de la conductivité thermique.....	45
Figure 2-23 - Epaisseur en mètres pour un pouvoir isolant équivalent (Maquette AZEL (42)).....	45
Figure 2-25- Briques rouges et parpaing béton .....	47
Figure 2-26- Les 9 projets répartis sur les différentes zones climatiques (45).....	49
Figure 2-27 - Exemple projet en construction	Figure 2-28 - Lame d'air 10cm.....
Figure 3-1 - Principes d'analyse de sensibilité.....	53
Figure 3-2 - Problèmes d'optimisation et problématique.....	56
Figure 3-3 - Méthodologies d'optimisation multicritère.....	58
Figure 3-4- Revue des méthodes d'optimisation les plus utilisées .....	59
Figure 3-5- Représentation d'un individu .....	61
Figure 3-6- Méthodologie d'un GA.....	61
Figure 3-7- Exemple d'un croisement à un point .....	62
Figure 3-8- exemple d'un croisement multipoint.....	63
Figure 3-9- Opérateur de mutation.....	63
Figure 3-10 - Exemple d'un front de Pareto pour 2 objectifs.....	64
Figure 3-11 - Réseau de Neurones.....	69
Figure 3-12- Interface de Genopt (65).....	71
Figure 3-13 - Cahier des charges de conception du logiciel SAMOT.....	73
Figure 3-14 - Principales bibliothèques Python utilisées.....	74
Figure 3-15 - Etapes de création de SAMOT.....	75
Figure 3-16 - Interaction SAMOT - TRNSYS.....	76
Figure 3-17 - Logos des récentes versions de TRNSYS.....	76
Figure 3-18 - Méthode générale sous Python.....	76
Figure 3-19 - Exemple de saisie des inputs.....	77
Figure 3-20 - Méthodologie de l'analyse de sensibilité et interface SAMOT.....	78
Figure 3-21 - Méthodologie d'optimisation sur TRNSYS et interface SAMOT pour l'optimisation avec l'algorithme NSGA-II.....	78
Figure 3-22- Représentation 3D des résultats	Figure 3-23 - Représentation 3D du front de Pareto

<i>Figure 3-24 - Projection 2D des solutions</i> .....	81
<i>Figure 4-1 - Evénements extrêmes liés au changement climatique (82)</i> .....	84
<i>Figure 4-2 - Evolution des températures selon les différents scénarios (102)</i> .....	87
<i>Figure 4-3 - Températures par scénario à Settat</i> .....	87
<i>Figure 4-4 - Scénario B1</i> .....	88
<i>Figure 4-5 - Scénario A2</i> .....	88
<i>Figure 4-6 - Température du sol &amp; température extérieure</i> .....	91
<i>Figure 4-7 - Modélisation sous TRNSYS (88)</i> .....	91
<i>Figure 4-8 - Température opérative du bâtiment</i> .....	92
<i>Figure 4-9 - Besoins de chauffage et climatisation en kWh</i> .....	93
<i>Figure 4-10 - Variantes étudiées lors de l'élaboration du RTCM (30)</i> .....	93
<i>Figure 4-11 - Optimisation à deux critères</i> .....	95
<i>Figure 4-12 - Comparaison des nombres de simulations par méthode</i> .....	99
<i>Figure 4-13 - Indices de sensibilité totaux de Sobol (calcul de l'effet total)</i> .....	99
<i>Figure 4-14 - Coefficient d'erreur sur le calcul des indices totaux, par paramètre</i> .....	100
<i>Figure 4-15 - Résultats d'hiérarchisation des paramètres, N = 10, 100, 500, 1000 et 2000</i> .....	101
<i>Figure 4-16 - Coefficient d'erreur sur le calcul de l'indice Mu_Star, par paramètre</i> .....	102
<i>Figure 4-17 - Hiérarchisation des paramètres pour N = 10, 20, 50, 100, 200 et 1000</i> .....	103
<i>Figure 4-18 - Indices d'erreur sur l'indice S1</i> .....	104
<i>Figure 4-19 - Indices Mu pour les besoins de chauffage</i> .....	105
<i>Figure 4-20 - Indices Mu pour les besoins de climatisation</i> .....	106
<i>Figure 4-21 - Rayonnement en W/m<sup>2</sup> - Façades Nord, Sud, Est et Ouest</i> .....	107
<i>Figure 4-22 - Indices de sensibilité pour le scénario B1</i> .....	108
<i>Figure 4-23 - Exploration de l'espace des paramètres d'entrée par l'échantillonnage de SOBOL</i> .....	111
<i>Figure 4-24 - Indices de sensibilité pour le scénario A2</i> .....	112
<i>Figure 4-25 - Méthodologies d'optimisation</i> .....	113
<i>Figure 4-26 - Méthodologie de la méthode directe</i> .....	113
<i>Figure 4-27 - Projections 2D des résultats</i> .....	114
<i>Figure 4-28 - Boîtes à moustaches pour les 13 inputs</i> .....	115
<i>Figure 4-29 - Scénario présent - modèles d'ordre 1, 2 et 3</i> .....	118
<i>Figure 4-30 - Scénario 2050 - modèles d'ordre 1, 2 et 3</i> .....	118
<i>Figure 4-31 - Scénario 2100 - modèles d'ordre 1, 2 et 3</i> .....	119
<i>Figure 4-32 - Projections 2D du front de Pareto pour le scénario B1</i> .....	120
<i>Figure 4-33 - Comparatif des algorithmes d'optimisation pour le scénario B1</i> .....	122
<i>Figure 4-34 - Résultats des analyses de sensibilité Mu, Méthode de Morris</i> .....	124

<i>Figure 4-35 - Nouvelle méthodologie d'optimisation multicritère.....</i>	<i>125</i>
<i>Figure 4-36 - Résultats des optimisations par fonction.....</i>	<i>127</i>
<i>Figure 4-37 - Projection 2D des résultats.....</i>	<i>131</i>
<i>Figure 4-38 - Valeurs des paramètres d'entrée dans les combinaisons étudiées.....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 4-39 - Résultats d'optimisation avec un plan LHS de 300 combinaisons.....</i>	<i>134</i>