



HAL
open science

Contribution à l'intégration de systèmes de gestion optimale de l'énergie pour les bâtiments intelligents

Badr Chegari

► **To cite this version:**

Badr Chegari. Contribution à l'intégration de systèmes de gestion optimale de l'énergie pour les bâtiments intelligents. Automatique / Robotique. Université Grenoble Alpes [2020-..]; Université Hassan II (Casablanca, Maroc), 2022. Français. NNT : 2022GRALT057 . tel-03852443

HAL Id: tel-03852443

<https://theses.hal.science/tel-03852443>

Submitted on 15 Nov 2022

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

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

Un bâtiment doit assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur.

– **(Chatelet et al., 1998)**

La seule certitude, c'est que rien n'est certain.

– **Pline l'Ancien**

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants Mohammed Tabaa, Emmanuel Simeu et Fouad Moutaouakkil pour m'avoir si bien soutenu durant cette période de thèse et pour avoir été toujours disponible. Mohammed, je te remercie d'avoir cru en moi depuis le premier entretien de sélection et de m'avoir fait confiance. Merci pour le soutien moral et pour m'avoir permis de découvrir en quoi consiste le noble métier de chercheur. Merci également de m'avoir fait connaître Emmanuel dans le cadre d'une convention de cotutelle qui restera gravée dans ma mémoire. Une telle opportunité et un professeur comme Emmanuel, m'ont apporté beaucoup de valeurs ajoutées à mon projet de recherche, que ce soit en terme de formations, de relations ou même le côté financier puisque Emmanuel s'est occupé de la démarche administrative de mon dossier de candidature pour la bourse d'excellence Eiffel avant mon arrivé en France. Merci Emmanuel pour ton engagement et pour ton soutien continu. Grâce à nos nombreux échanges, j'ai appris de beaux-arts : la manière de penser, la rigueur, l'analyse, la précision et bien d'autres encore. Fouad, je te remercie pour tout le soutien que tu m'as apporté tout au long de la période de cette thèse. Je t'ai trouvé toujours disponible pour pallier à tout type de problème. Mille mercis encore pour vous tous.

Vous étiez tous les trois toujours gentils et attentionnés envers moi. Avec vous, j'ai appris à prendre du recul, à être bienveillant et à me faire confiance. Sans oublier les nombreuses qualités personnelles et les connaissances culturelles que j'ai acquises au cours de nos discussions. Je vous en serai éternellement reconnaissant !

Je remercie également les membres du jury : M. Sofiene Dellagi, M. Abdelhadi RAIHANI et M. Driss Zejli qui m'ont honoré en étant les rapporteurs de cette thèse. Je remercie aussi Mme Nadia Machkour, M. Fabrice Monteiro, et M. Manuel J. Barragan pour avoir accepté d'être examinateurs de cette thèse. Merci également à Badreddine Benameur pour avoir présidé le jury.

Mes sincères remerciements à tous mes collègues de chacun des Laboratoires TIMA, LPRI et LRI : doctorants, professeurs, chercheurs et administratifs. Je remercie tous les membres de chacune des équipes RMS et EAS pour leur accueil chaleureux et pour leurs échanges constructifs. Je leur souhaite à tous une bonne continuation. Je remercie en particulier Youssef Ait Ali pour son soutien technique et sa serviabilité.

Enfin, j'adresse ma sincère gratitude à ma chère mère Fatima et mon cher père Abdelaziz qui ont œuvré pour ma réussite, pour leur amour, leur soutien, tous les sacrifices consentis et leurs précieux conseils, pour toute leur aide et leur présence dans ma vie, reçoivent à travers ce travail, aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Je tiens également à remercier ma sœur Fidae qui a toujours été présente à mes côtés dans les hauts et les bas pour me soutenir dans la réussite de cette thèse. Enfin, je tiens à remercier mon épouse Zaineb, pour le soutien spectaculaire qu'elle m'a apporté tout au long de cette thèse.

Résumé

Le bâtiment est considéré comme le premier secteur consommateur d'énergie dans le monde. Au Maroc, face à la crise économique et aux engagements pris pour limiter les effets du réchauffement climatique, il est devenu impératif de réduire la consommation énergétique des bâtiments. Dans ce contexte, la recherche de solutions techniques optimales au regard des performances liées à la demande d'énergie et au confort est un problème très complexe en raison du nombre élevé de paramètres à prendre en compte. Pour remédier à ce problème, un état de la technique des méthodes existantes dans cet axe de recherche est réalisé. Celui-ci nous a amené à constater que plusieurs lacunes existent dans l'utilisation de ces méthodes, principalement le temps de calcul élevé qu'elles nécessitent et le manque de contrôle de la convergence des résultats vers les optima globaux recherchés.

Cette thèse a pour objectif principal le développement d'une nouvelle méthode puissante, fiable et rapide pour la conception de bâtiments confortables et efficaces sur le plan énergétique. En se basant sur des outils de simulation numérique et sur les techniques d'intelligence artificielle, nous avons développé avec succès des modèles de substitution permettant la prédiction optimale des besoins énergétiques et du confort thermique pour le cas des bâtiments résidentiels. Le choix et la configuration des variables de conception sont soigneusement établis sur la base de l'état actuel de la technique, soutenu par une analyse de sensibilité, afin de mieux comprendre à la fois l'influence de chaque variable sur la performance attendue et la corrélation entre elles. Cela nous a permis de formuler mathématiquement le problème à optimiser, dont la résolution entraîne la recherche de solutions optimales dans une dimension multi-objectif. A l'aide des algorithmes métaheuristiques, le processus d'optimisation est réalisé avec succès conduisant à la génération de la frontière de Pareto optimale, qui n'est autre qu'un ensemble de solutions optimales par rapport aux critères considérés. Cet ensemble de solutions permet d'atteindre l'objectif souhaité avec une très bonne précision, et surtout un temps de calcul drastiquement réduit. Cette méthode peut donc être un outil très efficace pour aider les concepteurs et les décideurs dans le domaine de la construction à concevoir des bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique.

Mots-clés : Efficacité Energétique ; Bâtiments à Consommation Quasi Nulle ; Confort Thermique ; Simulation Numérique ; Intelligence Artificielle ; modèles de substitution, Optimisation Mutli-Objectif ; Algorithmes Metaheuristiques.

Abstract

The building industry is considered the first energy consuming sector in the world. In Morocco, faced with the economic crisis and the commitments made to limit the effects of global warming, it has become imperative to reduce the energy consumption of buildings. In this context, the search for optimal technical solutions with regard to the performances related to the energy demand and comfort is a very complex problem because of the high number of parameters to be taken into account. To overcome this problem, a state of the art of existing methods in this research axis is realized. We found that several shortcomings exist when using these methods, mainly the high computation time they require and the poor control of converging results towards the global optimum sought.

The main objective of this thesis is to develop a new efficient, reliable and rapid method for designing comfortable and energy efficient buildings. Based on numerical simulation tools and artificial intelligence techniques, we have successfully developed surrogate models enabling the optimal prediction of energy demand and thermal comfort for residential buildings. The choice and configuration of design variables are carefully established based on the current state of the art, supported by sensitivity analysis, to better understand both the influence of each variable on the expected performances and the correlation between them. This allowed us to mathematically formulate the optimization problem, whose resolution involves the search for optimal solutions in a multi-objective dimension. By using metaheuristic algorithms, the optimization process is successfully carried out leading to generate the Pareto optimal frontier, which corresponds to a set of optimal solutions with respect to the considered criteria. These solutions can be used to reach the desired outcome with a very good accuracy, and especially with a drastically reduced computation time. This method can therefore be a very effective tool to support designers and decision-makers in the construction field to design comfortable and highly energy efficient buildings.

Keywords: Energy Efficiency; Nearly Zero Energy Buildings; Thermal Comfort; Numerical Simulation; Artificial Intelligence; Substitution models, Mutli-Objective Optimization; Metaheuristic Algorithms

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	III
Abstract	IV
Table des matières	V
Liste des Figures	IX
Liste des Tableaux	XI
Introduction générale	1
1. CHAPITRE 1 : ÉNERGETIQUE DU BATIMENT	4
1.1 Introduction	4
1.2 Contexte et enjeux	4
1.2.1 A l'échelle internationale	4
1.2.2 A l'échelle marocaine	8
1.3 Cadre réglementaire et normatif	12
1.3.1 A l'échelle internationale	12
1.3.1.1 Normes	12
1.3.1.1.1 ASHRAE 90.1	13
1.3.1.1.2 ISO 50001	14
1.3.1.1.3 ISO 7730	15
1.3.1.1.4 NF EN 15232	17
1.3.1.1.5 NF EN 16247-2	18
1.3.1.2 Règlements	19
1.3.1.2.1 Code de construction énergétique en Chine	19
1.3.1.2.2 Code de construction énergétique en Inde	20
1.3.1.2.3 Code de construction énergétique au Japon	21
1.3.1.2.4 Code de construction énergétique au Canada	22
1.3.1.2.5 Code de construction énergétique en France	23
1.3.1.2.6 Code de construction énergétique en Italie	24
1.3.1.2.7 Code de construction énergétique en Espagne	25
1.3.1.2.8 Code de construction énergétique en Algérie	26
1.3.1.3 Labels et certifications	27
1.3.1.3.1 BREEAM et Eco-Homes	29
1.3.1.3.2 Leadership in Environmental and Energy Design (LEED)	30
1.3.1.3.3 Minergie	32
1.3.1.3.4 Passiv'Haus	33
1.3.1.3.5 Ordonnance solaire thermique (OST)	34
1.3.1.3.6 Labels énergétiques en France	35
1.3.1.3.6.1 Haute Qualité Environnementale (HQE)	35
1.3.1.3.6.2 Effinergie+	36
1.3.1.3.6.3 Bepos Effinergie 2013	37
1.3.1.3.6.4 HPE Rénovation	37
1.3.1.3.6.5 Bâtiment Basse Consommation (BBC)	37
1.3.2 A l'échelle marocaine (RTCM)	38
1.4 Paramétrage des volets énergétiques dans le bâtiment	41
1.4.1 Volet passif	42
1.4.1.1 Emplacement du bâtiment	42
1.4.1.2 Architecture du bâtiment	42
1.4.1.3 Enveloppe du bâtiment	43
1.4.1.3.1 Parois opaques	44

1.4.1.3.2	Ouvertures-----	45
1.4.1.3.3	Ponts thermiques -----	47
1.4.1.3.4	Protection solaire-----	48
1.4.2	Volet actif-----	49
1.4.2.1	Ventilation -----	50
1.4.2.1.1	Ventilation naturelle -----	50
1.4.2.1.2	Ventilation mécanique-----	51
1.4.2.1.3	Ventilation hybride-----	54
1.4.2.1.4	Puits climatique-----	54
1.4.2.1.5	Free cooling-----	55
1.4.2.2	Éclairage -----	56
1.4.2.3	Production locale d'énergie-----	56
1.4.2.3.1	Chaudières -----	57
1.4.2.3.2	Pompe à chaleur-----	58
1.4.2.3.3	Systèmes solaires-----	58
1.4.2.3.3.1	Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI)-----	58
1.4.2.3.3.2	Systèmes Solaires Combinés (SSC)-----	59
1.4.2.3.3.3	Climatisation solaire-----	59
1.4.2.3.3.4	Photovoltaïque -----	60
1.4.2.3.3.5	Éolienne-----	61
1.4.2.3.4	Transfert d'énergie par pompage -----	62
1.4.2.3.5	Batterie de stockage d'énergie -----	63
1.5	Conclusion -----	64
2.	CHAPITRE. 2 : AIDE A LA CONCEPTION DE BATIMENTS CONFORTABLES ET A HAUTE EFFICACITE ENERGETIQUE : ETAT DE LA TECHNIQUE-----	66
2.1	Introduction -----	66
2.2	Etat de la technique -----	66
2.2.1	Formulation-----	67
2.2.1.1	Variables de conception-----	68
2.2.1.1.1	Forme -----	69
2.2.1.1.2	Parois opaques-----	71
2.2.1.1.3	Parois vitrées-----	72
2.2.1.1.4	Ombrage-----	73
2.2.1.1.5	Ventilation naturelle -----	74
2.2.1.1.6	Masse et inertie thermique -----	77
2.2.1.1.7	Discussion-----	77
2.2.1.2	Fonctions objectif-----	77
2.2.1.2.1	Aspects énergétique et environnemental -----	78
2.2.1.2.1.1	Indicateurs énergétiques -----	78
2.2.1.2.1.2	Indicateurs environnementaux -----	79
2.2.1.2.2	Aspects économiques-----	80
2.2.1.2.3	Aspects sociaux et sociétaux-----	82
2.2.1.2.3.1	Confort thermique -----	83
2.2.1.2.3.2	Confort visuel -----	85
2.2.1.2.3.3	Confort acoustique-----	86
2.2.1.2.3.4	Qualité de l'air intérieur -----	86
2.2.1.2.3.5	Autres indicateurs-----	87
2.2.1.2.4	Discussion-----	87
2.2.2	Pré-optimisation -----	88
2.2.2.1	Passage direct-----	88
2.2.2.2	Passage par la méta-modélisation-----	89
2.2.2.2.1	Polynômes-----	90
2.2.2.2.2	Réseaux de neurones-----	92
2.2.2.2.2.1	Neurone artificiel -----	93

2.2.2.2.2	Réseau de neurones-----	94
2.2.2.2.3	Krigeage-----	96
2.2.2.2.4	Autres modèles de substitution-----	97
2.2.2.2.5	Erreur d'un modèle de substitution-----	98
2.2.2.2.5.1	Contrôle de l'erreur-----	98
2.2.2.2.5.2	Estimation de l'erreur-----	100
2.2.2.2.6	Discussion-----	104
2.2.3	Optimisation-----	105
2.2.3.1	Généralité-----	105
2.2.3.2	Algorithmes d'optimisation-----	108
2.2.3.2.1	Méthodes exactes-----	108
2.2.3.2.2	Méthodes déterministes-----	108
2.2.3.2.2.1	Méthode du simplexe Nelder Mead-----	109
2.2.3.2.2.2	Méthodes de gradient-----	109
2.2.3.2.3	Métaheuristiques stochastiques-----	110
2.2.3.2.3.1	Notions de dominance et d'optimalité au sens de Pareto-----	111
2.2.3.2.3.1.1	Optimum de Pareto-----	111
2.2.3.2.3.1.2	Notion de dominance-----	112
2.2.3.2.3.1.3	Frontière de Pareto-----	112
2.2.3.2.3.1.4	Notion de domination contrainte-----	114
2.2.3.2.3.2	Algorithmes évolutionnistes-----	114
2.2.3.2.3.2.1	Principe de fonctionnement-----	115
2.2.3.2.3.2.2	NSGA-II-----	117
2.2.3.2.3.3	Recuit simulé-----	121
2.2.3.2.3.4	Algorithmes de colonies de fourmis-----	122
2.2.3.2.3.5	Algorithmes d'optimisation par essais particuliers-----	123
2.2.3.2.3.5.1	Optimisation mono-objectif par essaim particulaire (PSO)-----	124
2.2.3.2.3.5.2	Optimisation multi-objectif par essaim particulaire (MOPSO)-----	126
2.2.3.2.3.6	Recherche tabou-----	129
2.2.3.2.4	Autres méthodes-----	129
2.3	Problématique et lacunes-----	130
2.4	Contribution et limites-----	133
2.5	Conclusion-----	135
3.	CHAPITRE. 3 : NOUVELLE APPROCHE POUR L'AIDE A LA CONCEPTION DE BATIMENTS CONFORTABLES ET A HAUTE EFFICACITE ENERGETIQUE	
	136	
3.1	Introduction-----	136
3.2	Méthode proposée-----	137
3.2.1	Présentation-----	137
3.2.2	Formulation-----	138
3.2.2.1	Définition des variables de conception-----	138
3.2.2.1.1	Parois opaques-----	139
3.2.2.1.2	Parois vitrées-----	139
3.2.2.1.3	Ombrage-----	140
3.2.2.1.4	Renouvellement d'air-----	140
3.2.2.2	Définition des fonctions objectif-----	141
3.2.2.2.1	Demande annuelle en énergie thermique (ATED)-----	141
3.2.2.2.2	Moyenne annuelle pondérée des degrés-heures d'inconfort (ADH)-----	142
3.2.2.3	Définition des contraintes-----	142
3.2.3	Pré-optimisation-----	143
3.2.3.1	Modélisation-----	143
3.2.3.1.1	Description du bâtiment de référence-----	143
3.2.3.1.2	Zonage thermique-----	144

3.2.3.1.3	Modélisation du processus de simulation -----	145
3.2.3.1.3.1	Composition de l'enveloppe -----	146
3.2.3.1.3.2	Gains de chaleur internes -----	147
3.2.3.1.3.3	Conditions de conditionnement d'air -----	148
3.2.3.1.3.4	Données météorologiques -----	149
3.2.3.2	Développement de modèles de substitution -----	151
3.2.3.2.1	Création de la base de données -----	152
3.2.3.2.2	Apprentissage et validation -----	155
3.2.3.2.3	Évaluation de la précision -----	158
3.2.3.2.4	Analyse de sensibilité -----	160
3.2.4	Optimisation -----	161
3.2.4.1	Choix de l'algorithme approprié -----	162
3.2.4.1.1	Paramétrage -----	162
3.2.4.1.2	Application et sélection -----	163
3.2.4.2	Solutions obtenues -----	166
3.2.4.2.1	Conception optimale -----	167
3.2.4.2.2	Potentiel d'amélioration -----	168
3.3	Application sur 6 zones climatiques -----	169
3.3.1	Métamodélisation -----	169
3.3.2	Optimisation -----	173
3.3.3	Évaluation de l'autosuffisance énergétique -----	178
3.3.3.1	Modélisation -----	178
3.3.3.2	Résultats -----	180
3.4	Conclusion -----	184
	Conclusion générale et perspectives -----	185
	Annexe 1-A : Les exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments résidentiels au Maroc [6].-----	i
	Annexe 1-B : Les exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments tertiaires au Maroc [6].-----	ii
	Annexe 2 : Caractéristiques intrinsèques de certaines lampes [310]. -----	iii
	Annexe 3-A : Les variables de conception utilisées dans la littérature. -----	iv
	Annexe 3-B : Les variables de conception utilisées dans la littérature. -----	v
	Annexe 4 : Brève littérature scientifique sur l'optimisation à base de modèles de substitution pour la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique. -----	vi
	Annexe 5 : Procédure de l'algorithme de Garson pour l'analyse de sensibilité.-----	vii
	Annexe 6 : L'architecture du raccordement du bâtiment au système de production d'énergie local dans l'environnement TRNSYS. -----	ix
	Annexe 7 : Les caractéristiques électriques des composants du système local de production d'énergie.-----	x
	Annexe 8 : Variation des indicateurs d'évaluation de l'autosuffisance énergétique du bâtiment dans différentes zones climatiques. -----	xi
	Référence -----	xv
	Publications scientifiques -----	xxxi

Liste des Figures

Figure 1.1. (a) La répartition de la consommation finale totale (TFC) par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition de la consommation finale totale (TFC) par secteur en 2019 [8].	5
Figure 1.2. (a) La répartition de la production d'électricité par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition de la consommation finale d'électricité par secteur en 2019 [8].	6
Figure 1.3. (a) La répartition des émissions de CO ₂ par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition des émissions de CO ₂ par secteur en 2019 [8].	7
Figure 1.4. (a) La répartition de la consommation finale totale (TFC) par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition de la consommation finale totale (TFC) par secteur en 2019 [8].	9
Figure 1.5. (a) La répartition de la production d'électricité par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition de la consommation finale d'électricité par secteur en 2019 [8].	10
Figure 1.6. (a) La répartition des émissions de CO ₂ par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition des émissions de CO ₂ par secteur en 2019 [8].	11
Figure 1.7. Échelle chronologique de création de quelques labels internationaux [29].	29
Figure 1.8. Carte du zonage climatique du Maroc [6].	39
Figure 1.9. Besoins énergétiques spécifiques en matière de chauffage et de climatisation pour chaque zone climatique [6].	40
Figure 1.10. Variantes de ponts thermiques les plus courantes.	48
Figure 1.11. Comportement du rayonnement au contact d'un matériau [59].	49
Figure 1.12. Effet combiné du vent et du tirage thermique [65].	51
Figure 1.13. Prototype d'une maison équipée d'une ventilation mécanique simple flux [66].	52
Figure 1.14. Prototype d'une maison équipée d'une ventilation mécanique double flux [66].	53
Figure 1.15. Schéma de principe de l'échangeur de chaleur pour les saisons d'hiver et d'été [70].	53
Figure 1.16. Principe de fonctionnement d'un puits climatique pour la ventilation d'une maison individuelle [75].	55
Figure 1.17. Variation du chauffage, du free-cooling et de la climatisation lorsque la température de fonctionnement libre est (a) supérieure (b) inférieure à la température extérieure [76].	56
Figure 1.18. Panneaux photovoltaïques monocristallins et polycristallins.	61
Figure 1.19. Schéma de principe d'une éolienne.	62
Figure 1.20. Les différents enjeux dans le secteur du bâtiment.	65
Figure 2.1. Exemple de représentation de l'espace de recherche et de l'espace objectif qui correspondent à un problème à trois variables et deux fonctions objectif.	67
Figure 2.2. Les fonctions objectif possibles et les principales variables de conception pour un problème d'optimisation de la performance des bâtiments.	68
Figure 2.3. Logigramme de calcul des heures d'inconfort.	84
Figure 2.4. Réseau de neurones avec deux entrées, une couche cachée de quatre neurones et une sortie.	94
Figure 2.5. Exemple de dominance.	112
Figure 2.6. Exemples de frontière de Pareto.	113
Figure 2.7. Schéma d'un croisement de deux quartiers selon des bandes Nord-Sud [240].	116
Figure 2.8. Schéma de principe d'un algorithme évolutionnaire [241].	117
Figure 2.9. Obtention de la nouvelle population par croisement et mutation, puis classification par dominance et nichage [243].	118
Figure 2.10. Classement des solutions dans l'algorithme NSGA-II par dominance puis par nichage pour F ₃ . Les 10 solutions retenues sont entourées en noir, et celles rejetées sont marquées d'une croix.	119
Figure 2.11. Déplacement d'une particule suivant trois composantes.	124
Figure 3.1. Illustration des étapes fondamentales de l'approche proposée	138
Figure 3.2. Illustration des étapes fondamentales de l'approche proposée	144
Figure 3.3. Plan 2D du rez-de-chaussée et zonage thermique.	144
Figure 3.4. Plan 2D du premier étage et zonage thermique.	145
Figure 3.5. Plate-forme de calcul dans l'environnement TRNSYS.	146
Figure 3.6. Variation de la température extérieure (maximale et minimale) pendant une année pour les six zones climatiques du Maroc.	150
Figure 3.7. Fréquences cumulées annuelles de la température extérieure des zones climatiques étudiées.	151

<i>Figure 3.8. Processus d'approbation du nombre de simulations adoptées pour la création de la base de données.</i>	155
<i>Figure 3.9. Les architectures des deux ANNs à trois couches Feed-Forward pour f_1 et f_2.</i>	156
<i>Figure 3.10. Implémentation de l'algorithme PSO dans la phase d'apprentissage des réseaux de neurones.</i>	157
<i>Figure 3.11. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED.</i>	159
<i>Figure 3.12. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH.</i>	159
<i>Figure 3.13. La régression entre les prédictions du modèle ANN-MLP et les simulations réalisées par TRNSYS pour l'ATED.</i>	159
<i>Figure 3.14. La régression entre les prédictions du modèle ANN-MLP et les simulations réalisées par TRNSYS pour l'ADH.</i>	160
<i>Figure 3.15. L'importance relative de chaque variable d'entrée pour l'estimation de l'ATED et de l'ADH.</i>	161
<i>Figure 3.16. Evolution des frontières de Pareto en 4 tests pour le NSGA-II.</i>	165
<i>Figure 3.17. Evolution des frontières de Pareto en 4 tests pour le MOPSO.</i>	165
<i>Figure 3.18. Evolution des frontières de Pareto en 4 tests pour le MOGA.</i>	165
<i>Figure 3.19. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Agadir.</i>	170
<i>Figure 3.20. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Tanger.</i>	170
<i>Figure 3.21. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Fes.</i>	170
<i>Figure 3.22. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Ifrane.</i>	171
<i>Figure 3.23. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Marrakech.</i>	171
<i>Figure 3.24. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Errachidia.</i>	171
<i>Figure 3.25. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Agadir.</i>	172
<i>Figure 3.26. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Tanger.</i>	172
<i>Figure 3.27. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Fes.</i>	172
<i>Figure 3.28. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Ifrane.</i>	173
<i>Figure 3.29. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Marrakech.</i>	173
<i>Figure 3.30. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Errachidia.</i>	173
<i>Figure 3.31. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat d'Agadir.</i>	175
<i>Figure 3.32. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat de Tanger.</i>	175
<i>Figure 3.33. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat de Fes.</i>	175
<i>Figure 3.34. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat d'Ifrane.</i>	176
<i>Figure 3.35. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat de Marrakech.</i>	176
<i>Figure 3.36. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat d'Errachidia.</i>	176
<i>Figure 3.37. Architecture du système local d'approvisionnement en énergie pour répondre aux charges thermiques du bâtiment.</i>	179
<i>Figure 3.38. Variation de la production d'énergie locale et de la demande d'énergie électrique pour la conception de base et la conception optimisée à Agadir.</i>	182
<i>Figure 3.39. Variation de l'énergie envoyée à la charge et de l'énergie envoyée ou tirée de la batterie pour la conception de base et la conception optimisée à Agadir.</i>	182
<i>Figure 3.40. Variation de l'énergie envoyée ou tirée du réseau pour la conception de base et la conception optimisée à Agadir.</i>	182
<i>Figure 3.41. Variation de la production d'énergie locale et de la demande d'énergie électrique pour la conception de base et la conception optimisée à Errachidia.</i>	183
<i>Figure 3.42. Variation de l'énergie envoyée à la charge et de l'énergie envoyée ou tirée de la batterie pour la conception de base et la conception optimisée à Errachidia.</i>	183
<i>Figure 3.43. Variation de l'énergie envoyée ou tirée du réseau pour la conception de base et la conception optimisée à Errachidia.</i>	183

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Échelle de sensation thermique à sept niveaux [13]. -----	17
Tableau 1.2. Besoins spécifiques thermiques annuels maximaux de chauffage et de climatisation en kWh/m ² .an. -----	40
Tableau 1.3. Valeurs réglementaires des performances énergétiques minimales [39]. -----	41
Tableau 2.1. Description de l'applicabilité des catégories utilisées. -----	84
Tableau 3.1. Les modèles de fenêtres externes considérés pour la variable x_{11} . -----	140
Tableau 3.2. Les différents niveaux des variables de conception sélectionnées -----	141
Tableau 3.3. Composition et propriétés thermo-physiques des parois opaques et vitrées. -----	147
Tableau 3.4. Gains de chaleur internes. -----	148
Tableau 3.5. Conditions de conditionnement d'air. -----	148
Tableau 3.6. Localisation et données météorologiques. -----	151
Tableau 3.7. Paramétrage des algorithmes d'optimisation appliqués. -----	163
Tableau 3.8. Paramétrage du nombre d'itérations et de la taille de la population pour les quatre tests. -----	163
Tableau 3.9. Les trois meilleures solutions Pareto-optimales obtenues par chaque algorithme sur les quatre tests. -----	166
Tableau 3.10. Les particularités du temps de calcul des algorithmes proposés dans les quatre tests. -----	166
Tableau 3.11. Variables de conception des quatre solutions retenues. -----	167
Tableau 3.12. Potentiel d'amélioration des quatre solutions retenues par rapport à la conception de base. ---	168
Tableau 3.13. Variables de conception de la meilleure solution pour chaque zone climatique. -----	177
Tableau 3.14. Potentiel d'amélioration de la solution retenue par rapport à la conception de base dans chaque zone climatique. -----	177
Tableau 3.15. L'autosuffisance énergétique et le potentiel d'amélioration pour chacune des zones climatiques étudiées. -----	180

Introduction générale

La transition énergétique représente une voie permettant de transformer le secteur énergétique mondial en passant des combustibles fossiles à une énergie sans carbone d'ici la seconde moitié de ce siècle. Récemment, il a été constaté que dans les années à venir, les ressources énergétiques conventionnelles, à savoir le pétrole, le charbon et le gaz, finiront par s'épuiser. Cela est dû à la forte dépendance énergétique des populations vis-à-vis de ces ressources, ce qui constitue une sérieuse menace pour la planète entière. Selon les différentes éditions des Conférences des Parties (COP) sur le changement climatique, l'un des principaux objectifs a été fixé pour limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à au moins « bien en dessous de 2°C » pour ce siècle par rapport aux niveaux préindustriels. Les énergies renouvelables, associées à des améliorations rapides de l'efficacité énergétique, sont la pierre angulaire d'une solution durable pour le climat. Maintenir l'augmentation de la température mondiale en dessous de 2 degrés Celsius (°C) est techniquement possible. Cela serait également plus positif d'un point de vue économique, social et environnemental que la politique et la planification actuelle. Toutefois, le système énergétique mondial doit subir une transformation radicale pour passer d'un système fortement tributaire des combustibles fossiles à un système favorisant l'efficacité énergétique et s'appuyant sur les énergies renouvelables [1].

La principale solution alternative à la crise énergétique contemporaine, due à la fin de vie des sources d'énergie conventionnelles, ne peut être les énergies renouvelables [2], mais plutôt la fusion nucléaire [3]. Cependant, les énergies renouvelables restent une source considérable qui contribuera à une part acceptable des besoins énergétiques tout en réduisant le taux d'émission de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment, parmi les différents secteurs consommateurs d'énergie, semble être celui qui peut bénéficier de manière significative des énergies renouvelables. Ceci est dû, d'une part, au fait qu'il représente une part importante de la consommation énergétique et, d'autre part, à la possibilité d'intégrer plusieurs sources renouvelables, à savoir le photovoltaïque, les micro-éoliennes, la géothermie, etc. En effet, dans le monde, ce secteur consomme environ 40% de l'énergie totale et contribue à 30% des émissions mondiales annuelles de gaz à effet de serre [4]. Au Maroc, il consomme environ 33.6% de la consommation totale d'énergie finale du pays, dont 25.4% pour le secteur résidentiel et 8.2% pour le secteur tertiaire [5]. Par conséquent, ce secteur doit subir une mutation très importante puisqu'il représente le deuxième plus grand consommateur d'énergie au Maroc.

Le Maroc est considéré comme un pays en développement. La réduction de la consommation énergétique des bâtiments n'était pas une priorité compte tenu des impacts économiques des travaux supplémentaires pour améliorer la performance énergétique en phase de construction. Ce n'est que dans l'année 2014 que le décret pour la mise en place de la première réglementation thermique de la construction (RTCM) a été publié [6]. L'objectif est d'initier les concepteurs et les maîtres d'ouvrage à la notion de construire des bâtiments confortables et économes en énergie. Le choix du Maroc comme territoire d'application pour notre travail de recherche vient du fait que nous disposons d'un bâtiment typique récemment construit comme pilote pour l'expérimentation.

La transition vers des bâtiments confortables et à énergie positive nécessite la mise en place de techniques innovantes. Pour parvenir à une approche durable sans recours aux énergies fossiles, la conception de bâtiments avec une enveloppe énergétiquement efficace est obligatoire. En effet, plusieurs paramètres doivent être pris en considération dans la modélisation énergétique. Des études paramétriques sont donc nécessaires pour identifier les différentes solutions optimales pour atteindre les objectifs souhaités. Ce type d'étude devient irréalisable en termes de temps de calcul lorsque le nombre de paramètres devient élevé. Il est donc nécessaire de développer des méthodes rapides et efficaces pour remédier à ce problème.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail de recherche. Il vise à développer une nouvelle méthode innovante pour l'aide à la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique. Cette méthode consiste à développer, dans un premier temps, des modèles de substitution, fondés sur des techniques d'intelligence artificielle, pour la prédiction optimale des besoins énergétiques ainsi que des degrés-heures d'inconfort thermique. L'apprentissage de ces modèles repose sur des bases de données de petite taille, soit les plus petites possibles pour un problème d'optimisation complexe, afin de réduire le temps nécessaire à la simulation. Les différents échantillons qui constituent les bases de données requises sont simulés à l'aide des outils de simulation numérique et dynamique, plus particulièrement TRNSYS et Matlab. L'optimisation multi-objectif est ensuite établie à l'aide d'un algorithme métaheuristique afin de déterminer les solutions optimales pour les différentes zones climatiques du Maroc. L'objectif de cette méthode est de contribuer à combler les lacunes existantes dans la littérature, par sa robustesse, sa fiabilité et surtout son temps de calcul qui est drastiquement faible.

Le présent manuscrit est organisé en trois chapitres précédés d'une introduction générale et suivis d'une conclusion générale et de perspectives. Dans le premier chapitre, une synthèse détaillée sur le contexte et les enjeux de l'énergétique du bâtiment est présentée. Ceci est suivi

par la présentation du cadre réglementaire, à savoir les normes, les règlements, les labels et les certifications tant au niveau international que marocain. Nous présentons ensuite le paramétrage de chacun des volets passif et actif du bâtiment pour la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique.

Dans le chapitre 2, nous avons présenté un état de la technique sur les différentes techniques utilisées pour l'aide à la conception de bâtiments économes en énergie. Ceci a été abordé en divisant cette section en 3 phases principales, à savoir la formulation du problème d'optimisation, la phase préalable à l'optimisation, qui doit être réalisée soit directement par l'utilisation de modèles analytiques ou par l'utilisation de moyens de simulation numérique, soit indirectement par la métamodélisation de modèles de substitution, et finalement l'optimisation métaheuristique. Cela nous a permis d'identifier les différentes lacunes des techniques existantes, et ainsi de positionner notre approche et sa valeur contributive. Avant de conclure ce chapitre, nous avons présenté les éventuelles limites de la méthode proposée.

Le dernier chapitre est consacré à l'application de la méthode proposée dans le contexte d'une construction neuve d'un bâtiment résidentiel dans plusieurs zones climatiques du Maroc. La description technique et la modélisation du problème d'optimisation et des différents systèmes impliqués sont présentées. Des modèles de substitution permettant la prédiction optimale des besoins énergétiques et du confort thermique sont développés. Le processus d'optimisation est ensuite appliqué, à l'aide des algorithmes métaheuristicques, pour la détermination des solutions de compromis optimales entre les performances considérées. Enfin, un système hybride de production locale d'énergie est conçu pour évaluer le taux d'autosuffisance énergétique du bâtiment étudié.

Chapitre 1 : Énergétique du bâtiment

1.1 Introduction

Suite à l'exploitation du charbon qui a rendu possible la révolution industrielle au XIXe siècle, le taux d'augmentation de la consommation d'énergie primaire n'a cessé de s'accroître. Cette augmentation a été accompagnée de répercussions négatives sur l'environnement. A cet effet, des réflexions et des engagements ont été pris sur le plan international par la signature de certains protocoles tels que le protocole de Kyoto en 1997, ou lors de la conférence des parties qui a été organisée à Paris en 2015 sur les changements climatiques (COP21).

Le bâtiment est considéré comme étant le secteur le mieux placé pour offrir des possibilités de progrès suffisamment importantes pour répondre à ces engagements. Il se positionne comme un facteur clé pour relever les défis énergétiques, économiques et environnementaux.

Ce chapitre introductif présente le contexte général dans lequel s'inscrit le travail de cette thèse. Il est présenté de manière à faire le lien entre les enjeux énergétiques, économiques et environnementaux, avec une attention particulière pour le secteur du bâtiment, que ce soit à l'échelle mondiale ou nationale (Maroc), où se situent les zones climatiques qui font l'objet de notre étude. Ensuite, nous présentons les différentes prescriptions normatives proposées par les standards internationaux, les réglementations thermiques et les labels. Enfin, nous présentons le paramétrage des volets énergétiques du bâtiment.

1.2 Contexte et enjeux

1.2.1 A l'échelle internationale

Depuis la révolution industrielle, le mode de vie des pays occidentaux est inextricablement lié à la présence d'une énergie abordable et facilement accessible. Ce modèle de civilisation « moderne » à haute intensité énergétique s'est désormais répandu partout dans le monde, et continue aujourd'hui à gagner du terrain dans les pays en développement. Cela a été rendu possible grâce à un approvisionnement énergétique principalement assuré par les combustibles fossiles, au point que ceux-ci représentent actuellement en moyenne environ 66% de la production mondiale d'énergie primaire [7].

En effet, le monde connaît périodiquement des crises énergétiques, ce qui plaide en faveur du développement durable. La fin des réserves de charbon en Europe, déjà anticipée à la fin du 19ème siècle par W. Stanley Jevons, a conduit à une crise structurelle dans de nombreuses

régions du Vieux Continent. Le pic de production de pétrole conventionnel aux États-Unis a été atteint à la fin des années 70 du 19^{ème} siècle, comme l'avait prédit M. King Hubbert. Les crises pétrolières de 1973 et 1979 ont accentué la vulnérabilité des sociétés industrielles face à l'engorgement énergétique.

Au cours des 44 années écoulées (de 1973 à 2018), la consommation mondiale d'énergie finale a augmenté de 109% et en 2018, selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), elle s'élevait à 9 938 Millions de Tonnes Équivalent Pétrole (Mtep), dont 19% sous forme d'électricité. Depuis 1990, elle a augmenté un peu plus vite que la population, mais sa répartition par source d'énergie n'a pas beaucoup changé [7].

Actuellement, la consommation finale totale d'énergie dans le monde est répartie comme suit: la fameuse source d'énergie conventionnelle, qui n'est autre que le pétrole, arrive en tête de liste avec une part très importante qui s'élève à 40%, puis l'électricité (20%), le gaz naturel (16%), le charbon (10%), les biocarburants et les déchets (10%) et enfin les autres types de sources avec une part qui ne dépasse pas 4% (Figure 1.1-(a)). Cette consommation est ensuite répartie sur plusieurs secteurs d'activité, dont 29% pour l'industrie, 29% pour le transport, 29% pour le bâtiment, 9% pour les usages non énergétiques, 2% pour l'agriculture et moins de 2% pour les autres types d'activités (Figure 1.1-(b)).

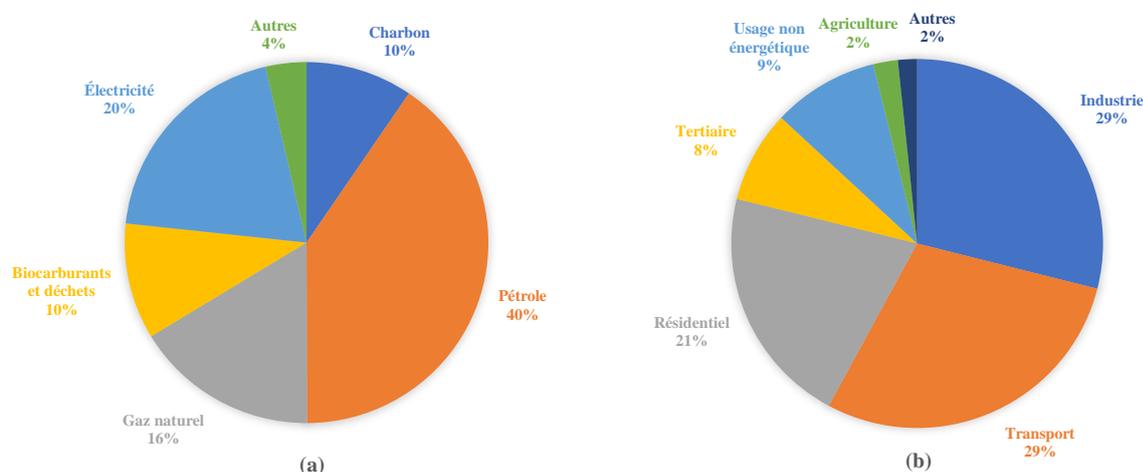


Figure 1.1. (a) La répartition de la consommation finale totale (TFC) par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition de la consommation finale totale (TFC) par secteur en 2019 [7].

La source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation, qui peut être transformée en plusieurs sous-sources potentielles. Une partie de celle-ci est exploitée pour produire de l'électricité dans de nombreuses centrales, notamment les centrales thermiques, les centrales nucléaires, les centrales photovoltaïques, etc. En effet, la production d'électricité peut actuellement être répartie par source d'énergie, où le charbon

représente la part la plus importante, soit 37% de la production mondiale d'énergie électrique, suivi du gaz naturel (23%), des énergies renouvelables (24%), de l'énergie nucléaire (10%), et enfin du pétrole, des biocarburants et d'autres sources d'énergie, dont la part ne dépasse pas 6% (Figure 1.2-(a)). Ces chiffres démontrent la forte dépendance mondiale aux combustibles fossiles pour la production d'électricité, mentionnée ci-dessus, bien qu'ils soient responsables d'un changement climatique dangereux pour la planète. De plus, l'approvisionnement de ces ressources comporte de fortes incertitudes et peut très rapidement être perturbé par des événements d'origine naturelle (ex : épuisement du charbon) ou technique (ex : catastrophe industrielle), voire géopolitique (ex : instabilité politique dans la région du Moyen-Orient). Cette énergie électrique produite sous sa forme finale est ensuite répartie sur plusieurs postes de consommation en fonction du secteur d'activité, parmi lesquels le secteur du bâtiment arrive en tête avec une part très importante qui s'élève à 48%, suivi par l'industrie (42%), l'agriculture (3%), le transport (2%) et moins de 5% pour les autres types d'activités (Figure 1.2-(b)).

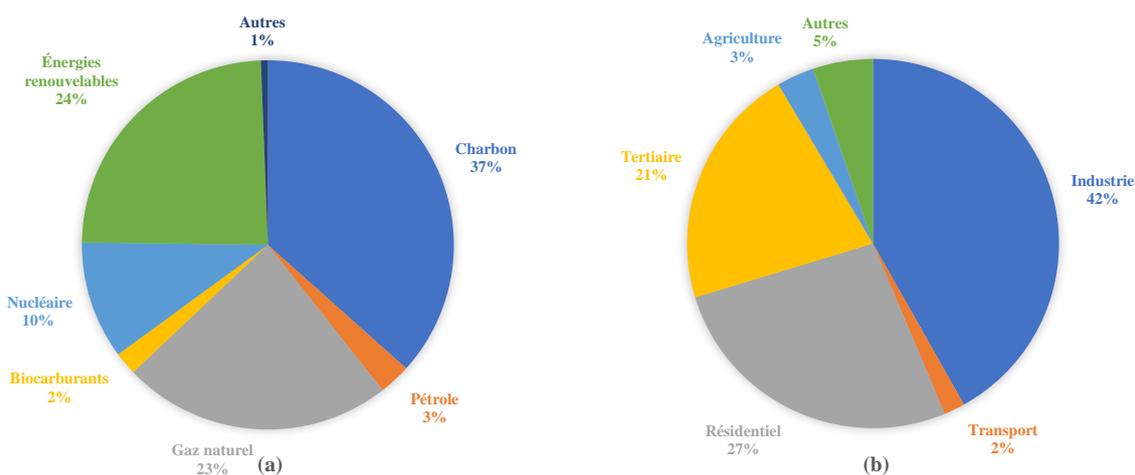


Figure 1.2. (a) La répartition de la production d'électricité par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition de la consommation finale d'électricité par secteur en 2019 [7].

La tendance planétaire est actuellement orientée vers le développement durable, pour lequel il a été mis en évidence que de nombreuses sources d'énergie, dont certaines sont semi-renouvelables et d'autres renouvelables, ont été installées et le seront de plus en plus pour combler le vide qui sera apparu à la fin du cycle des sources d'énergie conventionnelles, qui auront disparu dans quelque temps. Ceci afin de lutter contre la crise énergétique qui représente une véritable menace pour la planète. En effet, l'enjeu n'est plus seulement l'épuisement de ces ressources conventionnelles, mais surtout les conséquences environnementales de la consommation énergétique. L'humanité a déjà émis plus de la moitié de la quantité de carbone qu'elle pouvait se permettre d'émettre pour espérer limiter le réchauffement climatique à 2

degrés Celsius, soit l'objectif fixé à Copenhague en 2009. Les émissions de CO₂ par source d'énergie peuvent être réparties comme suit : Le charbon arrive en tête avec une part importante qui représente 44%, suivi du pétrole (34%), du gaz (21%) et moins de 1% pour les autres sources d'énergie (Figure 1.3-(a)). Ces émissions peuvent également être réparties par secteur d'activité, dont les producteurs d'électricité et de chaleur représentent la part la plus importante, qui s'élève à 42%, suivi par le transport (24%), l'industrie (19%), le bâtiment (8%), les autres industries énergétiques (5%), l'agriculture (1%) et moins de 1% pour les autres types d'activités (Figure 1.3-(b)).

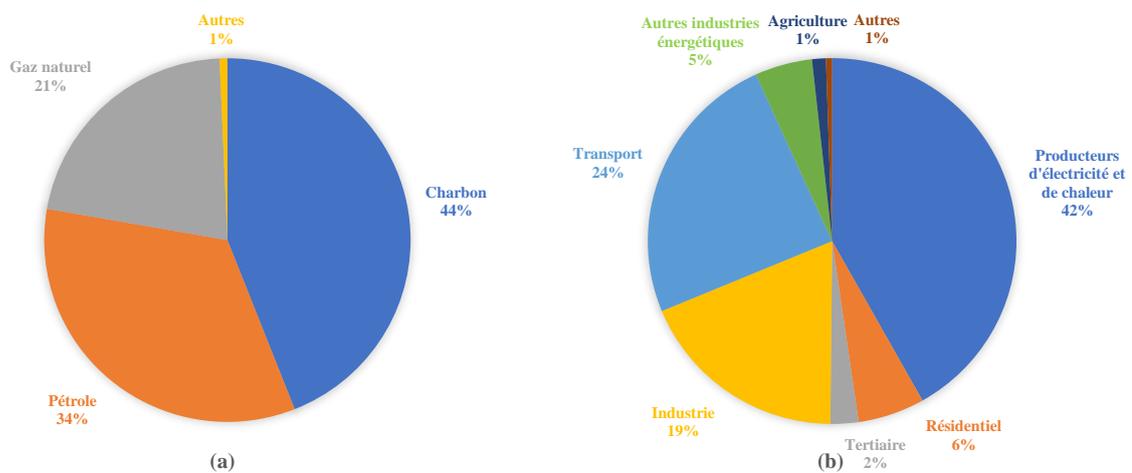


Figure 1.3. (a) La répartition des émissions de CO₂ par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition des émissions de CO₂ par secteur en 2019 [7].

Les chiffres présentés ci-dessus révèlent qu'il existe encore une forte dépendance aux ressources énergétiques conventionnelles, bien que celles-ci soient désormais appelées à disparaître dans très peu de temps. En conséquence, le pourcentage de la consommation finale provenant des sources d'énergie conventionnelles devra diminuer au fur et à mesure que les réserves mondiales de ces ressources diminuent jusqu'à ce qu'il devienne nul. En revanche, les énergies renouvelables sont devenues de plus en plus employées en tant que source irréfutable pour produire de l'électricité, puisque la part qu'elles représentent actuellement est de 24% de la production mondiale d'énergie électrique. La réalisation de ce chiffre constitue un potentiel important et continuera de croître dans les années à venir, dans la mesure où les différentes stratégies envisagées en matière de développement durable prévoient des milliers d'installations et de solutions nouvelles, renouvelables et propres, pour remédier à la crise énergétique imminente.

L'aspect environnemental est devenu l'un des critères fondamentaux à prendre en considération lors de l'élaboration d'une politique énergétique en vigueur. Le secteur du bâtiment est

actuellement le plus énergivore au monde, représentant 48% de la consommation finale d'énergie électrique, dont 27% pour le secteur résidentiel et 21% pour le secteur tertiaire. Il est également responsable des émissions de gaz à effet de serre, dont il occupe la quatrième place devant les producteurs d'électricité et de chaleur, le transport et l'industrie. Ce secteur est donc très bien placé pour répondre à la majorité des défis envisagés, grâce à la mise en place de mesures concrètes, tant en termes d'économies d'énergie que de réduction de l'empreinte environnementale de la consommation.

Ces enjeux globaux doivent être abordés en fonction des conditions en vigueur dans chaque pays, y compris le choix de la politique énergétique et de la politique environnementale. Le mix énergétique pourra donc varier, en fonction des différents potentiels et contraintes de chaque pays.

1.2.2 A l'échelle marocaine

Le Royaume du Maroc est un pays situé au Nord-Ouest de l'Afrique, avec des côtes sur la Mer Méditerranéenne et l'Océan Atlantique. La capitale est Rabat. En 2017, la population du Maroc était de 34.8 millions d'habitants, et la plus grande ville, Casablanca, comptait près de 4 millions d'habitants. Les autres grandes villes sont Agadir et Kénitra, sur la côte atlantique, Tanger, Tétouan, Nador, Oujda et Fès au nord, et Marrakech à l'intérieur du pays.

Selon les examens réguliers et approfondis que l'IEA consacre aux politiques énergétiques de ses pays membres, en particulier le Maroc, une synthèse faisant le point sur la situation, les enjeux énergétiques et les recommandations a été élaborée pour veiller à l'ambitieuse transition énergétique nationale du pays à l'horizon 2030 [8].

Le secteur énergétique marocain est à forte intensité de carbone, les combustibles fossiles représentant près de 90% de l'approvisionnement total en énergie primaire (TPES). Le pétrole reste le plus fort moteur de la croissance de la TPES, représentant 62% de la TPES en 2017, suivi du charbon (22%) et du gaz naturel (5%). Cette forte dépendance aux combustibles fossiles, importés dans leur quasi-totalité, a des implications indéniables sur la sécurité énergétique du Maroc. La facture énergétique liée à l'importation des combustibles fossiles s'est élevée à 69.5 milliards de dirhams en 2017, soit environ 6.3 milliards d'euros [8].

La consommation finale totale (TFC) du Maroc a atteint 16.1 Mtep en 2017, soit une augmentation de 34% par rapport aux 12.06 Mtep de 2007. Les combustibles fossiles représentent toujours la source d'énergie la plus consommée au Maroc, notamment le pétrole avec une part très importante, soit 75% de la consommation finale totale d'énergie, suivi de

l'électricité (17%) et enfin les biocarburants et les déchets (8%) (Figure 1.4-(a)). Cette consommation est ensuite répartie sur plusieurs secteurs d'activité, dont 37% pour le transport, 33% pour le bâtiment, 19% pour l'industrie, 8% pour l'agriculture et enfin 3% pour les usages non énergétiques (Figure 1.4-(b)). Les trois premiers secteurs sont tous porteurs d'une forte croissance. Depuis 2007, le secteur des transports a augmenté de 58%, le secteur résidentiel de 26% et l'industrie de 16% [8].

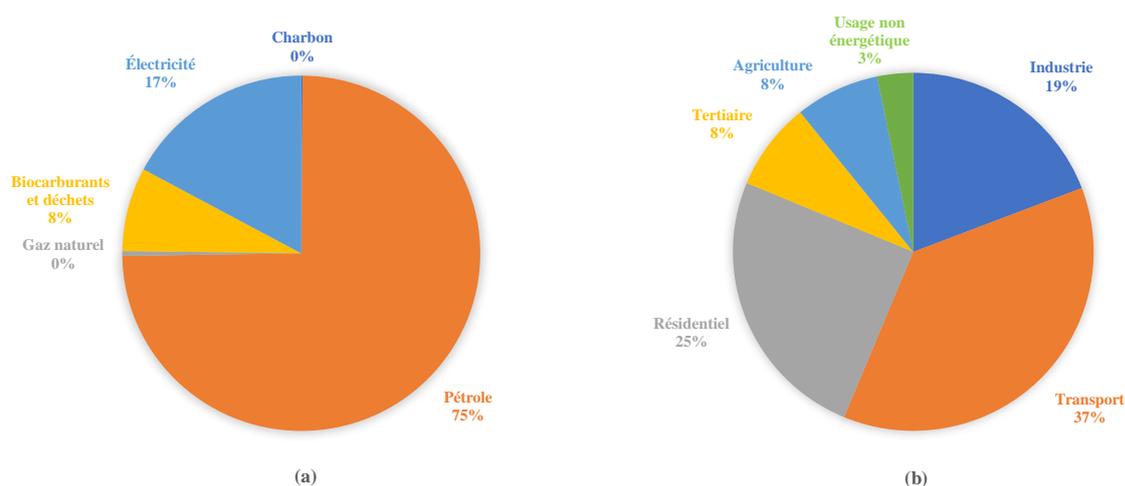


Figure 1.4. (a) La répartition de la consommation finale totale (TFC) par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition de la consommation finale totale (TFC) par secteur en 2019 [7].

Les politiques énergétique et climatique du Maroc ont connu des développements majeurs au cours des dernières années. Selon le dernier rapport publié par l'IEA sur la politique énergétique du Maroc, la TPES du pays a atteint 20.5 Mtep en 2017, soit une augmentation de 32% par rapport aux 15.6 Mtep de 2007. La TPES a augmenté en moyenne de 2.4% par an au cours de la dernière décennie, conformément à la croissance économique globale du pays. Les approvisionnements bruts en combustibles fossiles ont connu une croissance de 37% entre 2007 et 2017. Une augmentation significative de l'approvisionnement en gaz naturel (87%) a été soutenue par d'importantes importations d'Algérie entre 2005 et 2012. L'utilisation du gaz a toutefois atteint un plateau après 2012, à environ 1.22 milliard de mètres cubes par an. Le reste de la TPES était constitué de biocarburants et de déchets (7%), d'importations d'électricité (2%) et de petites parts d'énergie hydraulique, éolienne et solaire, dont la part ne dépasse pas 2%. Les sources renouvelables connaissent toutefois une croissance rapide à partir d'une base assez faible [8].

Au cours de la dernière décennie, l'hydroélectricité a augmenté de 29%, tandis que l'énergie solaire et éolienne a été multipliée par 15 fois. La production de biocarburants et de déchets a diminué de 29%. La production d'électricité au Maroc est actuellement basée sur le charbon

avec une part très importante qui s'élève à 68%, suivi par les énergies renouvelables (18%), le gaz naturel (8%), le pétrole (2%) et moins de 3% pour les autres sources d'énergie (Figure 1.5-(a)). Cette énergie électrique produite sous sa forme finale est ensuite répartie sur plusieurs postes de consommation en fonction du secteur d'activité, parmi lesquels le secteur du bâtiment arrive en tête avec une part très importante qui s'élève à 52%, suivi par l'industrie (37%), l'agriculture (10%) et enfin le transport (2%) (Figure 1.5-(b)).

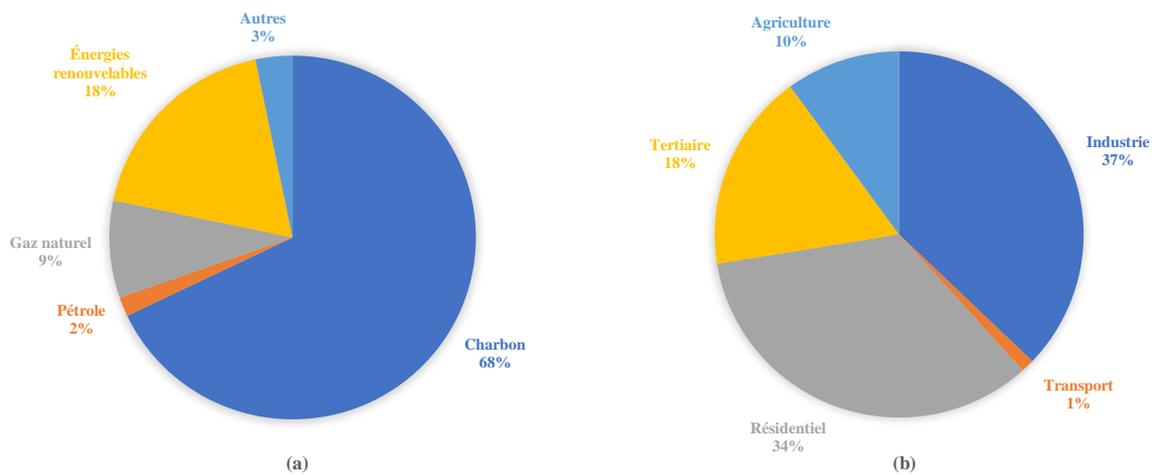


Figure 1.5. (a) La répartition de la production d'électricité par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition de la consommation finale d'électricité par secteur en 2019 [7].

Au cours de la décennie 2006-2016, les émissions totales de CO₂ liées à l'énergie ont augmenté de plus d'un tiers pour atteindre 55.3 MtCO₂ et de 181% depuis 1990 [8].

En 2016, le pétrole était responsable de 64% et le charbon de 31% des émissions totales, le reste provenant du gaz naturel et d'autres sources. Le pétrole est consommé dans de nombreux secteurs, tandis que les émissions liées à l'utilisation du charbon proviennent de la production d'électricité, comme le montre la Figure 1.5-(a).

La production d'électricité et les transports représentent la majeure partie des émissions de CO₂ liées à l'énergie au Maroc. En 2016, le secteur de l'électricité a émis 39% et le secteur des transports 31% des émissions totales. Le reste provenait de l'industrie (13%), des bâtiments résidentiels et commerciaux (12%) et de l'agriculture (5%). Les émissions ont augmenté rapidement dans tous les secteurs au cours de la dernière décennie, sauf dans l'industrie, qui a conservé une certaine stabilité. Entre 2006 et 2016, les émissions ont augmenté de 31% dans la production d'électricité, de 63% dans les transports l'industrie, de 58% dans le secteur résidentiel et commercial, et de 58% dans l'agriculture [8].

Depuis 1990, les émissions de CO₂ au Maroc ont été tirées par la croissance démographique (40%) et la croissance du PIB/habitant (90%). La croissance économique et les émissions de

CO₂ du Maroc sont étroitement liées, bien que les émissions aient récemment augmenté à un taux de croissance plus lent que l'économie. Par rapport aux pays membres de l'IEA, l'économie marocaine a un niveau relativement élevé d'intensité de carbone, mais les émissions par habitant sont beaucoup plus faibles que celles de tout autre membre de l'IEA, en raison de la faible consommation d'énergie par habitant. Dans un contexte de croissance des énergies renouvelables et d'utilisation du gaz naturel pour la production d'électricité, le Maroc a connu une baisse de 7% de son intensité carbone entre 2011 et 2016 [8].

En 2019, le pétrole et le charbon représentent toujours les principaux responsables des émissions de CO₂, avec une part de 57% pour le pétrole, suivi du charbon (40%) et enfin du gaz naturel (3%) (Figure 1.6-(a)). Ces émissions peuvent être réparties par secteur d'activité, dont les producteurs d'électricité et de chaleur représentent la part la plus importante, qui s'élève à 44%, suivi par le transport (29%), l'industrie (12%), le bâtiment (11%) et enfin l'agriculture (1%) (Figure 1.6-(b)).

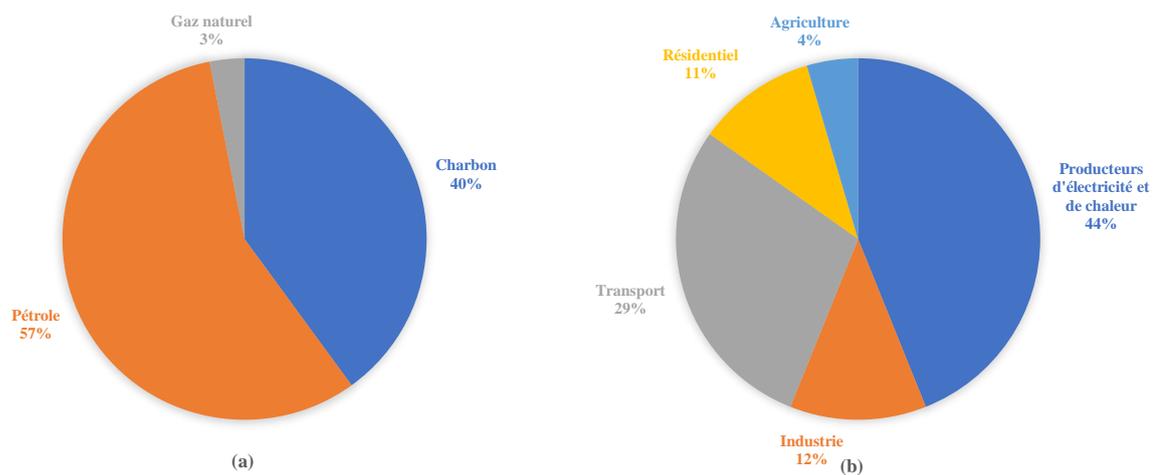


Figure 1.6. (a) La répartition des émissions de CO₂ par source d'énergie en 2019 et (b) La répartition des émissions de CO₂ par secteur en 2019 [7].

Les chiffres présentés ci-dessus montrent qu'il existe une forte dépendance aux ressources énergétiques conventionnelles, dans la mesure où 90% de la consommation d'énergie au Maroc est basée sur les combustibles fossiles. En outre, une augmentation de 32% de la consommation d'énergie entre 2007 et 2017 a été enregistrée, entraînant ainsi un sérieux problème pour la sécurité énergétique du Maroc. Pour faire face aux conséquences énergétiques, économiques et environnementales de ce problème, le Maroc a entrepris de développer fortement les énergies renouvelables dans le secteur de la production d'électricité : en 2009, il a été fixé comme objectif de porter à 42% (la part de ces filières en 2020 par rapport à la capacité totale installée du parc électrique marocain). Depuis, le Maroc a précisé que les énergies renouvelables devraient

représenter plus de 52% de la capacité électrique du pays à l'horizon 2030. Pour y parvenir, le pays mise sur les différentes sources d'énergies renouvelables : l'éolien (9.5% de la production électrique en 2017), l'hydroélectricité (4%), le solaire (1.3%), dont notamment les centrales thermodynamiques, etc.

L'aspect environnemental, comme mentionné précédemment, est l'un des critères fondamentaux à prendre en considération lors de l'élaboration d'une politique énergétique en vigueur. Le secteur du bâtiment est actuellement le plus énergivore au Maroc, représentant 52% de la consommation finale d'énergie électrique, dont 34% pour le secteur résidentiel et 18% pour le secteur tertiaire. Il est également responsable des émissions de gaz à effet de serre, dont il occupe la quatrième place devant les producteurs d'électricité et de chaleur, le transport et l'industrie. Ce secteur est donc très bien placé pour répondre à la majorité des défis envisagés sur le plan international au sens large, et plus particulièrement au Maroc. La mise en place de mesures concrètes, tant en termes d'économies d'énergie que de réduction de l'empreinte environnementale de la consommation, peut y contribuer.

Ces enjeux majeurs doivent être abordés dans le cadre réglementaire défini par les décideurs concernés, qui comprend le choix de la politique énergétique et de la politique environnementale. Les approches, les cadres et les solutions proposés par les chercheurs dans cette problématique sont particulièrement utiles pour y répondre.

1.3 Cadre réglementaire et normatif

Le cadre réglementaire, au sens large, est un dispositif de référence qui définit les normes à respecter applicables à un secteur donné. Le cadre réglementaire thermique en particulier est un dispositif de normes applicables au secteur de la construction qui permet d'encadrer la consommation énergétique des bâtiments.

1.3.1 A l'échelle internationale

Afin de résoudre les défis liés aux enjeux énergétiques, économiques et environnementaux dans le secteur du bâtiment, plusieurs lois et règlements sont mis à disposition par la plupart des pays du monde. Un aperçu de certaines normes, réglementations et labels liés à l'énergétique du bâtiment est présenté ci-dessous.

1.3.1.1 Normes

La norme est définie comme un corps de règles et de limites édictées par une autorité de normalisation, pour unifier les pratiques d'une famille de produits, en particulier le bâtiment dans le présent manuscrit. Actuellement, il existe de nombreuses normes internationales qui

uniformisent les exigences à respecter en fonction du domaine d'application concerné. Nous présentons ensuite certaines des normes les plus courantes dans le monde, qui portent sur le domaine de l'énergie au sens large et plus particulièrement l'énergétique du bâtiment, y compris le confort thermique.

1.3.1.1.1 ASHRAE 90.1

La norme ASHRAE 90.1 est un standard établi par l'Institut des normes nationales américaines (ANSI), publié par la Société américaine des ingénieurs du chauffage, de la réfrigération et du conditionnement d'air (ASHRAE) et coparrainé par la Société d'ingénierie de l'éclairage (IES), qui fournit des exigences minimales pour la conception écoénergétique des bâtiments de tous types. À l'exception des bâtiments résidentiels de faible hauteur, à savoir les maisons unifamiliales, les habitations multifamiliales de moins de quatre étages, les maisons mobiles et les maisons modulaires. La première édition de la norme ASHRAE 90 a été publiée en 1975. En 1999, le conseil d'administration de l'ASHRAE a voté en faveur de la mise à jour permanente de la norme, en raison de l'évolution rapide des technologies et des prix de l'énergie. Cette mesure a permis de la mettre à jour plusieurs fois par an. La norme a été renommée ASHRAE 90.1 en 2001. Depuis ce temps, elle a été mise à jour en 2004, 2007, 2010, 2013, 2016 et 2019 afin de refléter les dernières technologies.

Pour se conformer à cette norme, deux voies principales doivent être suivies, qui sont [9]:

Voie prescriptive : Tous les composants du bâtiment doivent répondre aux exigences minimales spécifiées par la norme ASHRAE 90.1. Ces exigences comprennent les éléments suivants :

- ✓ Enveloppe du bâtiment : Isolation minimale des murs, isolation minimale de la toiture, réflectance de la toiture, performance minimale des vitrages ;
- ✓ CVC : Efficacité minimale de l'équipement, caractéristiques minimales du système, limitation du réchauffage, limitation de la puissance des ventilateurs ;
- ✓ Eau chaude sanitaire : Efficacité minimale de l'équipement, caractéristiques minimales du système ;
- ✓ Alimentation électrique : Efficacité des transformateurs, commandes automatiques des prises, contrôle de l'énergie ;

- ✓ Éclairage : Densité de puissance maximale de l'éclairage intérieur (exprimée en watts/pied carré), commandes d'éclairage minimales, éclairage extérieur, éclairage des parkings ;
- ✓ Autres équipements : Moteurs électriques, pompes de surpression d'eau potable, ascenseurs et escaliers mécaniques.

Voie performantielle : La conception du bâtiment proposé doit avoir une consommation d'énergie inférieure à celle d'un bâtiment de base construit selon les spécifications de la norme ASHRAE 90.1. Ceci doit être démontré par les résultats de la simulation de ses performances.

Dans cette voie, un budget de coûts énergétiques de base (BCE) est établi, basé sur la taille et le programme du bâtiment. Ce BCE de base est établi en utilisant la simulation de performance du bâtiment pour modéliser un bâtiment de la même taille et du même programme que le bâtiment du projet, construit conformément aux exigences prescriptives de la norme ASHRAE 90.1. Le BCE est exprimé en unités de dollars. Une simulation de la performance du bâtiment est ensuite effectuée sur la conception du bâtiment proposé. Le budget des coûts énergétiques proposé doit être inférieur ou égal au budget des coûts énergétiques de référence pour assurer la conformité.

Cette voie est également utilisée pour démontrer l'efficacité énergétique de la conception, souvent exprimée en pourcentage par rapport à la norme ASHRAE 90.1. Les conceptions de bâtiments afficheront des performances telles que « *40% meilleures que la norme ASHRAE 90.1-2007* » ou « *20% meilleures que la norme ASHRAE 90.1-2010* ». Le pourcentage d'amélioration par rapport à la norme ASHRAE 90.1 est la base de l'attribution des points énergétiques dans le système d'évaluation LEED.

1.3.1.1.2 ISO 50001

La norme ISO 50001 est un référentiel international qui a été publié pour la première fois le 15 juin 2011 par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO). Elle constitue le fruit d'une collaboration menée par 61 pays. Elle vise à améliorer la performance énergétique de toute organisation. Sa mise en place est ainsi une source potentielle d'économies d'énergie pour les entreprises. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), cette norme pourrait avoir un impact sur 60% de la demande énergétique mondiale.

Cette norme fournit des lignes directrices pour le développement d'un système méthodique de gestion de l'énergie axé sur la performance énergétique. Sur la base d'un diagnostic énergétique initial, l'organisme conforme à la norme ISO 50001 définit ses objectifs énergétiques et établit

un plan de comptage de l'énergie. Un système de management conforme aux exigences de cette norme permet de réaliser des économies d'énergie et des réductions de coûts à court terme. Les principaux objectifs de cette norme consistent à lutter contre la rareté de l'énergie et l'augmentation soutenue de son prix, tout en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La norme ISO 50001 est fondée sur l'amélioration continue, un modèle de système de management que l'on retrouve dans d'autres normes bien connues, notamment ISO 9001 et ISO 14001. Il est ainsi plus facile pour un organisme d'intégrer la gestion de l'énergie dans ses efforts globaux de gestion de la qualité et de l'environnement.

Cette norme présente un cadre d'exigences permettant aux organisations de [10]:

- ✓ Développer une politique pour une utilisation plus efficace de l'énergie ;
- ✓ Fixer des cibles et des objectifs pour mettre en œuvre la politique envisagée ;
- ✓ Utiliser les données pour mieux comprendre et prendre des décisions sur l'utilisation et la consommation d'énergie ;
- ✓ Mesurer les résultats ;
- ✓ Examiner l'efficacité de la politique mise en place ;
- ✓ Améliorer en permanence la gestion de l'énergie.

Cette norme spécifie des exigences exhaustives en matière d'utilisation et de consommation d'énergie, y compris le comptage, la documentation et les rapports, la conception et l'achat d'équipements et de systèmes, les processus et le personnel qui contribuent à la performance énergétique. Toutefois, elle ne prescrit aucun critère de performance spécifique à l'énergie.

1.3.1.1.3 ISO 7730

La norme ISO 7730 [11] a été développée par l'ISO/TC 159, Ergonomie, Sous-comité SC 5, Ergonomie de l'environnement physique. L'édition 2005 de cette norme correspond à la troisième édition, qui annule et remplace la deuxième édition de 1994, qui a fait l'objet d'une révision technique. Une méthode d'évaluation à long terme a été ajoutée, ainsi que des informations sur l'inconfort thermique local, sur les ambiances thermiques variables et sur l'adaptation.

Les sensations thermiques chez l'homme sont principalement liées à l'équilibre thermique du corps dans son intégralité. Cet équilibre est influencé par son activité physique et son

habillement ainsi que par les paramètres de l'ambiance : température de l'air, température moyenne de rayonnement, vitesse et humidité de l'air. Lorsque ces facteurs ont été estimés ou mesurés, la sensation thermique du corps dans son intégralité peut être prédite en calculant l'indice de vote moyen prévisible (PMV). En complément, il existe l'indice PPD (Predicted Percentage Dissatisfied), qui donne des informations sur l'inconfort ou le mécontentement thermique en estimant le pourcentage de personnes susceptibles d'avoir trop chaud ou trop froid dans une ambiance donnée. L'indice PPD peut être déterminé à partir de l'indice PMV.

L'inconfort thermique peut également être causé par un refroidissement ou un réchauffement local indésirable du corps. Les causes les plus courantes d'inconfort local sont l'asymétrie de la température radiante (surfaces froides ou chaudes), les courants d'air (définis comme un refroidissement local du corps causé par le mouvement de l'air), les différences de température verticale et les sols froids ou chauds.

L'insatisfaction peut être causée par un inconfort chaud ou froid du corps dans son intégralité. Les limites de confort peuvent, dans ce cas, être exprimées par les indices PMV et PPD. Mais l'insatisfaction thermique peut également être causée par des paramètres locaux d'inconfort thermique.

Cette norme présente des méthodes permettant de prévoir la sensation thermique générale et le degré d'inconfort général (insatisfaction thermique) de toute personne exposée à des ambiances thermiques modérées. Elle permet de déterminer analytiquement et d'interpréter le confort thermique, par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local, en donnant les conditions des ambiances thermiques considérées acceptables au regard du confort thermique général et les conditions représentant les inconforts locaux.

Vote moyen prévisible (PMV) :

Le PMV est un indice qui donne la valeur moyenne des votes d'un groupe important de personnes exprimant leur sensation thermique sur une échelle à 7 niveaux (voir Tableau 1.1). Il est basé sur l'équilibre thermique du corps humain. L'équilibre thermique est atteint lorsque la production de chaleur interne du corps est égale à la perte de chaleur vers le milieu ambiant. Dans un milieu modéré, le système de thermorégulation humain tente automatiquement de modifier la température de la peau et la sécrétion de sueur pour maintenir l'équilibre thermique. L'indice PMV est donc obtenu au moyen de l'Eq. (1.1), avec M représentant le métabolisme énergétique, exprimé en W/m^2 . Celui-ci est calculé selon les équations mathématiques présentées dans la section 4 de la norme ISO 7730:2005 [12].

$$PMV = 0.303e^{(-0.036M)} + 0.028 \quad \text{Eq. (1.1)}$$

Tableau 1.1. Échelle de sensation thermique à sept niveaux [12].

+ 3	Chaud
+ 2	Tiède
+ 1	Légèrement tiède
0	Neutre
- 1	Légèrement frais
- 2	Frais
- 3	Froid

Pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) :

L'indice PPD est une estimation de la valeur moyenne des votes de sensation thermique donnés par un groupe important de personnes exposées à la même ambiance. Toutefois, les votes individuels sont dispersés autour de cette valeur moyenne et cela peut être utile pour prédire le nombre de personnes susceptibles de ressentir un inconfort chaud ou froid.

L'indice PPD établit une prévision quantitative du pourcentage de personnes thermiquement insatisfaites qui sont susceptibles d'avoir trop chaud ou trop froid. Cet indice est donc obtenu au moyen de l'Eq. (1.2), qui varie en fonction du PMV.

$$PPD = 100 - 95e^{(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2)} \quad \text{Eq. (1.2)}$$

1.3.1.1.4 NF EN 15232

La norme européenne EN 15232 est un standard qui établit des conventions et des méthodes pour estimer l'impact des systèmes d'automatisation, de contrôle et de gestion des bâtiments (GTB) sur la performance énergétique des bâtiments. Elle fournit également des lignes directrices pour tenir compte, dans la mesure du possible, des fonctions de systèmes d'automatisation, de contrôle et de gestion des bâtiments, dans le cadre des normes applicables préparées en vertu du mandat M/343. Cette Norme est coordonnée entre le CEN/TC 247, le CEN/TC 89, le CEN/TC 156, le CEN/TC 169 et le CEN/TC 228 afin de faciliter les activités opérationnelles des comités techniques. Elle complète de manière importante la série de normes qui définissent l'impact des systèmes de contrôle sur des domaines ou des équipements particuliers.

La norme NF EN 15232 définit les fonctions de gestion du contrôle qui doivent être prises en compte pour 7 domaines de base, en distinguant les fonctions associées. Ces domaines sont les suivants [13]:

- ✓ Régulation du chauffage ;
- ✓ Régulation de l'alimentation en eau chaude sanitaire ;
- ✓ Régulation du refroidissement ;
- ✓ Régulation de la ventilation et de la climatisation ;
- ✓ Commande de l'éclairage ;
- ✓ Commande des stores ;
- ✓ Gestion technique pour les foyers domestiques et les bâtiments.

Cette norme définit également deux méthodes de calcul permettant de considérer l'efficacité du système de gestion de la régulation :

- ✓ Une approche par fonction qui permet de prendre en compte, de manière directe, les incidences présentes dans le cœur de la méthode de calcul ;
- ✓ Une approche globale qui réside dans une classification globale par domaine. Pour chacun des domaines, de 1 à 7, mentionnés ci-dessus, le score du système est le plus mauvais des scores des fonctions correspondantes.

1.3.1.1.5 NF EN 16247-2

Le package de normes européennes EN 16247-(2 à 4) est un référentiel, publié par l'AFNOR, rassemblant 4 normes en un seul document [14]. Ces normes définissent les méthodes de référence de l'audit énergétique pour les différents secteurs d'activité les plus consommateurs d'énergie, à savoir le bâtiment, l'industrie et les transports. Il vient en appui à la réglementation thermique française qui rend les audits énergétiques obligatoires pour les grands organismes.

Selon la norme NF EN 16247-1 publiée en 2012, l'audit énergétique se définit comme étant un examen et une analyse méthodique de l'utilisation et de la consommation d'énergie d'un site, d'un bâtiment ou d'une organisation. Cette norme fournit les exigences générales pour la réalisation d'un audit énergétique conforme. Elle vise à identifier les flux énergétiques et les améliorations potentielles de l'efficacité énergétique, puis à en rendre compte. Elle indique la méthodologie et les actions à mener durant les différentes étapes d'un audit énergétique (définition de l'objectif, du périmètre, visite du site, etc.)

La norme NF EN 16247-2, publiée en 2014, spécifie les exigences, la méthodologie et les livrables d'un audit énergétique dans un bâtiment ou un groupe de bâtiments, à l'exclusion des logements individuels privés. Elle traite les différentes étapes de l'audit énergétique, à savoir :

le premier contact, la réunion de lancement, la collecte des données, le travail sur site, l'analyse des données, le rapport de synthèse, la réunion de clôture, etc. Cette norme doit être appliquée conjointement avec la norme NF EN 16247-1, à laquelle elle est complémentaire. Elle comporte des exigences supplémentaires qui doivent être appliquées simultanément à celles de la norme NF EN 16247-1.

1.3.1.2 Règlements

L'intégration de l'efficacité énergétique dans les codes du bâtiment est une stratégie reconnue pour réduire la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Dans le monde entier, les pays élaborent et instaurent de manière indépendante des politiques et des programmes d'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels et commerciaux afin de réduire le gaspillage d'énergie dans le nouveau parc immobilier.

1.3.1.2.1 Code de construction énergétique en Chine

La Chine est le pays le plus consommateur d'énergie au monde, détenant le premier classement en termes de consommation d'énergie, selon le dernier rapport publié par l'IEA en 2020. Les mesures d'efficacité énergétique des bâtiments en Chine ont suscité une attention croissante de la part du gouvernement depuis le milieu des années 1980, au moment où la Chine a commencé à construire à grande échelle dans les zones urbaines. La première loi chinoise sur la conservation de l'énergie, publiée en 1997, abordait l'importance des codes énergétiques des bâtiments dans l'un de ses cinquante articles. La loi révisée sur la conservation de l'énergie, publiée en 2007, comporte une section spécifique sur la conservation de l'énergie dans les bâtiments, qui comprend sept articles directement ou indirectement liés aux codes de l'énergie dans les bâtiments [15].

La première réglementation chinoise en matière de consommation d'énergie dans les bâtiments a été élaborée en 1986 pour les bâtiments résidentiels de la zone de chauffage du nord de la Chine, puis révisée en 1995. Les bâtiments situés dans la zone de chauffage doivent légalement être chauffés, avec des budgets de chauffage obligatoires en kilogrammes de charbon par mètre carré de surface au sol, et avant les années 1990, ils étaient les seuls bâtiments à utiliser des quantités significatives d'énergie pour la climatisation. L'objectif de la réglementation était de réduire la consommation d'énergie des bâtiments par rapport aux constructions préexistantes de 30% dans la version 1986, et de 50% dans la version 1995 de la réglementation. La version de 1986 visait à réduire de 30% les pertes de chaleur de l'enveloppe du bâtiment, tandis que la révision de 1995 a également apporté une amélioration de 20% de l'efficacité des systèmes de chauffage [16].

1.3.1.2.2 Code de construction énergétique en Inde

L'Inde est le troisième plus grand consommateur d'énergie au monde, selon le dernier rapport publié par l'IEA en 2020. L'explosion démographique en cours et la croissance économique rapide, ainsi que la tendance à l'urbanisation et à l'industrialisation, ont mis à rude épreuve les ressources énergétiques et l'environnement du pays. Dans le but de relever le défi énergétique de l'Inde et d'assurer sa sécurité énergétique, le gouvernement indien a décidé de mettre en place un plan visant à réduire l'intensité énergétique de la croissance du PIB en améliorant l'efficacité énergétique. À cette fin, trois codes de construction différents ont été élaborés, à savoir :

- ✓ Le Bureau des Standards Indiens (BIS) a élaboré le Code National du Bâtiment de l'Inde (NBC) en 2005, un instrument national complet fournissant des directives pour réglementer les activités de construction de bâtiments dans tout le pays. Il constitue un code modèle à adopter par toutes les agences impliquées dans la construction ;
- ✓ Le Bureau de l'Efficacité Énergétique (BEE) a développé un Code de Construction pour la Conservation de l'Énergie (ECBC), qui est le seul code énergétique national pour les bâtiments. Toutefois, ce code est volontaire et non obligatoire [17] ;
- ✓ Le Ministère de l'Environnement et des Forêts (MoEF) a développé l'Évaluation et l'autorisation de l'Impact sur l'Environnement (EIA). Les constructeurs et les promoteurs doivent obtenir une autorisation EIA avant la construction.

Le NBC contient certaines dispositions relatives à l'efficacité énergétique, bien qu'il ne soit pas spécifiquement destiné à améliorer l'efficacité énergétique. Par exemple, les exigences relatives à des matériaux structurels plus résistants signifient aussi fréquemment des matériaux plus efficaces sur le plan énergétique, avec des coefficients de transmission thermique (U) plus faibles.

En tant que premier code énergétique national autonome pour les bâtiments, la facilité d'utilisation, tant en termes d'exigences du code que de langage, a été la principale considération lors de l'élaboration de l'ECBC. En outre, l'élaboration de l'ECBC implique une large participation des parties prenantes, y compris plusieurs membres du comité ASHRAE 90.1. La structure de l'ECBC est calquée sur celle de la norme ASHRAE 90.1-2004. Le contenu de l'ECBC couvre l'enveloppe du bâtiment, le CVC, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage et l'énergie électrique.

En effet, il existe plusieurs approches que les concepteurs de bâtiments peuvent adopter pour se conformer à ce code énergétique. Bien qu'ils doivent assurer la conformité avec les mesures

impératives, ils disposent d'une certaine flexibilité pour répondre aux exigences prescriptives. Ils peuvent se conformer soit en respectant directement les critères prescriptifs, soit en négociant ces critères dans une section particulière du code sur la base des options de compromis de cette section, soit en utilisant la méthode de performance intégrale du bâtiment. Cette méthode impose un budget énergétique pour la conception d'un bâtiment, de sorte qu'un bâtiment est conforme tant qu'il respecte le budget, même s'il ne répond pas aux exigences normatives ou aux options de compromis d'une section particulière du code. Le budget est basé sur la consommation annuelle moyenne d'électricité (en kWh) d'un bâtiment dont la conception standard est décrite dans le code. Par exemple, un bâtiment peut avoir plus de fenêtres que ce qui est autorisé, à condition que son toit soit suffisamment isolé [18].

1.3.1.2.3 Code de construction énergétique au Japon

Au Japon, si la consommation d'énergie diminue dans les secteurs de l'industrie et des transports, la consommation d'énergie dans les secteurs des services et des ménages a augmenté de 20% depuis 1950 et représente actuellement environ 30% de la consommation totale d'énergie. C'est pourquoi, depuis une trentaine d'années, les autorités ont décidé de mener une réflexion sur l'élaboration d'une réglementation qui encadre la performance énergétique des bâtiments.

La réglementation japonaise en matière d'efficacité énergétique des bâtiments relève de la loi sur la conservation de l'énergie, adoptée pour la première fois en 1979, puis modifiée à plusieurs reprises, et enfin révisée de manière approfondie en 1999. En effet, au Japon, il existe deux types de réglementations énergétiques distinctes pour les bâtiments, dont la première concerne les bâtiments commerciaux non résidentiels et la seconde les bâtiments résidentiels. Les normes commerciales ont été adoptées pour la première fois en 1979, et les normes résidentielles en 1980, dans le cadre de la loi nationale japonaise sur les économies d'énergie. Les versions actuelles des deux réglementations ont été adoptées le 30 mars 1999. En plus de ces réglementations, le Japon a également mis en place un certain nombre de programmes non réglementaires pour promouvoir l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment le Centre Japonais pour l'Efficacité Energétique (ECCJ), le système d'évaluation CASBEE pour les bâtiments verts, et un système d'évaluation à quatre niveaux pour la performance des logements. Au cours des deux décennies et demie écoulées depuis que les économies d'énergie ont été identifiées comme une priorité pour le gouvernement, le Japon a mis en place un système à plusieurs niveaux pour promouvoir l'efficacité énergétique des bâtiments [19].

Le gouvernement japonais a pour projet de rendre les deux réglementations décrites ci-dessus obligatoires en 2007. Les statistiques gouvernementales indiquent que le taux de conformité a augmenté ces dernières années, passant de 13% en 2000 à 32% en 2004 pour les bâtiments résidentiels, et de 34% en 1999 à 74% en 2004 pour les bâtiments commerciaux. Une fois les normes rendues obligatoires, le taux de conformité devrait dépasser 80%.

1.3.1.2.4 Code de construction énergétique au Canada

Canada est l'un des pays les plus énergivores au monde. C'est pourquoi divers intervenants du pays ont demandé à la Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies (CCBFC) d'ajouter un nouvel objectif d'efficacité énergétique aux codes modèles nationaux. L'établissement de nouveaux objectifs doit suivre le Protocole relatif aux nouveaux objectifs des codes modèles nationaux, qui a été élaboré en 2009 par la CCBFC en collaboration avec le Comité consultatif provincial-territorial des politiques sur les codes (PTPACC). Ce protocole décrit les étapes nécessaires à l'examen et à l'établissement d'un nouvel objectif afin de s'assurer que le résultat répond aux besoins des provinces et des territoires, et qu'il est transparent pour toutes les parties intéressées.

Au Canada, les gouvernements provinciaux et territoriaux ont le pouvoir de promulguer des lois qui régissent la conception et la construction de bâtiments sur leur territoire. Cette législation peut inclure l'adoption du Code national de l'énergie pour les bâtiments (NECB) sans changement ou avec des modifications pour répondre aux besoins locaux, et la promulgation d'autres lois et règlements concernant la conception et la construction de bâtiments, y compris les exigences relatives à la participation professionnelle.

Le NECB est un code modèle qui contribue à promouvoir la cohérence entre les codes du bâtiment provinciaux et territoriaux. Les personnes qui participent à la conception ou à la construction d'un bâtiment devraient consulter le gouvernement provincial ou territorial concerné pour savoir quelles exigences de construction sont applicables.

L'élaboration du NECB est le fruit d'une collaboration entre le Conseil national de recherches du Canada (NRC), Ressources naturelles Canada (NRCan) et d'autres intervenants du milieu. Il a été mis au point pour la première fois en 1997, modifié en 2011 et révisé à nouveau en 2017. Dans le cadre des initiatives ecoENERGY du gouvernement du Canada, la contribution de NRCan permettra d'améliorer l'efficacité énergétique des nouveaux bâtiments et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ces mesures contribueront à des avantages à long terme pour l'économie et l'environnement du Canada [20].

1.3.1.2.5 Code de construction énergétique en France

La première réglementation thermique en France (RT) a été mise en place en 1974 par Pierre Mesmer suite au premier choc pétrolier de 1973, qui a déclenché une véritable sensibilisation à la nécessité d'économiser l'énergie. Cette réglementation ne concerne que les bâtiments résidentiels neufs, visant à réduire leur consommation d'énergie de 25%. Pour y parvenir, la RT1974 n'impose que la présence d'une fine couche d'isolation et l'installation d'une régulation automatique des systèmes de chauffage.

Le second choc pétrolier de 1979 conduira à la publication de la RT1982. L'objectif de cette nouvelle réglementation thermique consiste à réduire de 20% la consommation énergétique des bâtiments par rapport à la RT1974. Cette version a été révisée en 1988, où elle a été étendue aux bâtiments non résidentiels, introduisant des exigences minimales de performance pour l'enveloppe et tout système mis en place.

En 2001, une nouvelle édition de la réglementation thermique a fait son apparition, nommée RT2000. Cette version voit l'apparition d'une exigence de performance globale du bâtiment et de confort d'été, via le coefficient de température intérieure conventionnelle (TIC). Le but de la RT2000 est de réduire la consommation maximale des logements de 20% par rapport à la RT1988 et de réduire la consommation des bâtiments tertiaires de 40%.

En 2006, une nouvelle édition de la réglementation thermique a été introduite, basée sur la RT2000, avec une augmentation des exigences de consommation et des garde-fous, tout en considérant le côté du bio-climatisme et des énergies renouvelables. La RT2005 vise une réduction supplémentaire de 15% de la consommation d'énergie des bâtiments neufs et des extensions.

En 2013, l'apparition d'une nouvelle édition de la réglementation thermique, appelée RT2012, qui est devenue extrêmement exigeante en termes d'application, et ce pour tout projet de construction en France. Cette dernière est basée sur l'ancien label BBC (Bâtiment Basse Consommation) [21].

Aujourd'hui, une nouvelle réglementation thermique a été mise en place, appelée RT2020 ou RE2020, visant à construire des bâtiments à énergie positive, soit des bâtiments qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment, et des maisons passives, soit des maisons qui dépensent très peu d'énergie et recyclent l'énergie qu'elles produisent. Cet objectif est basé sur le principe des bâtiments à énergie positive (BEPOS). Ces bâtiments possèdent une consommation

énergétique minimale qui sera ensuite compensée par l'utilisation de ressources renouvelables. Cette Réglementation vise le zéro gaspillage énergétique et la production d'énergie.

1.3.1.2.6 Code de construction énergétique en Italie

Après la crise énergétique des années 70, l'Italie a adopté la première loi sur les économies d'énergie dans les bâtiments (loi 373/1976). Cette loi a été suivie par la loi 10/1991 mettant en œuvre le plan énergétique national et traitant les économies d'énergie et les énergies renouvelables dans les bâtiments. Cette loi a également introduit pour la première fois la certification de la performance énergétique des bâtiments. En Italie, le gouvernement national est responsable de la mise en œuvre et du suivi d'une politique énergétique plus large, telle que la mise en place de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) et d'autres directives européennes.

Le gouvernement national a publié des décrets mettant en œuvre la directive EPBD (2005), principalement axés sur les exigences énergétiques minimales pour les bâtiments, les méthodologies de calcul de la performance énergétique des bâtiments et les lignes directrices nationales pour la certification de la performance énergétique (2009). Cependant, les lois ultérieures mettant en œuvre la directive 2010/31/UE par le biais de la loi 90/2013, comprendront des exigences plus strictes pour limiter la consommation d'énergie dans les bâtiments. Dans quelques cas, certains codes de construction régionaux avaient déjà exigé des mesures d'économie d'énergie avant les lois nationales. La législation nationale la plus récente exige également que les régions qui n'ont pas adopté leurs propres règles de construction se conforment aux lignes directrices nationales.

La mise en pratique de l'EPBD au niveau national a pour objectif de décrire tout particulièrement les exigences minimales en termes de performance énergétique et de coefficient de transmission thermique pour les fenêtres, les murs, les planchers et les toits, dans le cas de nouvelles constructions et de rénovations importantes.

Dans le cas de la rénovation d'un système de chauffage, comme pour les nouveaux systèmes, le rendement saisonnier doit être supérieur à $(75 + 3 \log P_n)\%$, où P_n est la puissance nominale de la chaudière. Dans le cas d'un remplacement de chaudière, le rendement minimum de la chaudière doit être supérieur à $(90 + 2 \log P_n)\%$. Dans le cas d'une pompe à chaleur, le rendement minimum doit être supérieur à $(90 + 3 \log P_n)\%$.

Enfin, le décret législatif 28/2011 fait son apparition, qui se rapporte aux exigences d'utilisation des énergies renouvelables pour les nouveaux bâtiments et la rénovation des bâtiments

existants. Il définit une part minimale de production renouvelable de 35% pour les bâtiments construits entre 2014 et 2016 et de 50% pour ceux qui seront construits à partir de 2017 [22].

1.3.1.2.7 Code de construction énergétique en Espagne

La transposition de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) a commencé en Espagne par le biais de documents législatifs, publiés entre 2006 et 2007, qui concernent la conception et la construction de nouveaux bâtiments, l'exécution et la maintenance des installations thermiques et la certification de la performance énergétique.

La première version normative a été révisée et adaptée pendant plusieurs années jusqu'en 2013, et des mises à jour de chacun de ces documents ont été republiées, notamment :

- ✓ RD 235/2013 sur la certification énergétique des bâtiments ;
- ✓ RD 238/2013 sur les installations thermiques des bâtiments ;
- ✓ Le Code technique de la construction, arrêté 1635/2013 du ministère du Développement.

En Espagne, l'application de la DPEB en matière d'exigences de performance énergétique des bâtiments est basée sur le Code Technique de la Construction [23]. La réglementation concerne tous les bâtiments neufs ainsi que les bâtiments de plus de 1000 m² pour lesquels une réhabilitation de plus de 25% de la surface est réalisée. Pour ce faire, deux méthodes sont proposées :

Une méthode simplifiée basée sur le contrôle indirect des besoins énergétiques par la limitation des paramètres de l'enveloppe tels que les coefficients de transmission des parois en contact avec l'extérieur et le facteur solaire des vitrages en fonction de la zone climatique considérée. Le coefficient de transmission thermique des vitrages varie entre 1.9 et 5.7 W/m².K et le facteur solaire des fenêtres varie entre 0.29 et 0.6 selon l'orientation, la charge thermique interne (faible ou élevée), la surface des fenêtres et la zone climatique [23]. La réglementation exige également que l'humidité relative moyenne mensuelle ne dépasse pas 80%. Les bâtiments doivent être équipés de systèmes d'éclairage et de production d'énergie qui correspondent aux besoins des utilisateurs grâce à des systèmes de contrôle ajustés en fonction des scénarios d'occupation. De plus, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables est devenue obligatoire pour la production d'eau chaude sanitaire, tant pour les bâtiments résidentiels que tertiaires, ou pour la production d'énergie électrique dans les bâtiments tertiaires.

La deuxième méthode, dite générale, repose sur l'évaluation des besoins énergétiques à travers une comparaison avec un bâtiment de référence. La modélisation est réalisée à l'aide du logiciel LIDER. Les températures de consigne pour l'hiver et l'été sont respectivement de 21°C et 26°C.

1.3.1.2.8 Code de construction énergétique en Algérie

L'Algérie est le premier pays maghrébin à avoir mis en place une réglementation thermique des bâtiments depuis 1997 et qui est devenue obligatoire à partir de 2000. Cette réglementation, destinée aux bâtiments à usage d'habitation, a été conçue pour réduire la consommation de chauffage d'environ 25%, avec la possibilité de porter ce niveau d'économie à plus de 40% dans le futur.

Pour le calcul des besoins de chauffage, la réglementation propose deux méthodes de calcul, dont l'objectif est la maîtrise des besoins de chauffage et de refroidissement [24]:

Le calcul statique en thermique du 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 outil de Simulation Thermique Dynamique (STD) et les déperditions de base (DB) :

- ✓ Si $B_{dyn} \geq DB$; il faut prendre DB ;
- ✓ Si $B_{dyn} < DB$; deux cas peuvent se présenter. Si $B_{dyn} \leq 0.8 DB$, dans ce cas il faut prendre 0.8 DB, sinon B_{dyn} .

Pour les besoins en climatisation, la réglementation propose une méthode de calcul basée sur le calcul des apports calorifiques des bâtiments [25]. Il faut vérifier que la somme des apports calorifiques des parois vitrées et des parois opaques est inférieure aux apports calorifiques de référence calculés en juillet à 15 h pour une température intérieure sèche de 27°C, selon la zone climatique considérée.

Code de construction énergétique en Tunisie

Dans le cadre de l'efficacité énergétique des bâtiments, la loi n°2004-72 du 2 août 2004 ainsi que son décret d'application du 2 septembre 2004 ont intégré des mesures obligatoires en termes de performances thermiques des bâtiments neufs. Ensuite, la loi n°2009-7 du 9 février 2009, intervient pour modifier et compléter la loi n°2004-72 relative à la maîtrise de l'énergie. Les dispositions pratiques d'application du décret sont promulguées dans des arrêtés conjoints du ministère chargé de l'énergie et du ministère chargé du logement.

Compte tenu du mode de fonctionnement et du mode de consommation de l'énergie ainsi que des niveaux de confort à l'intérieur des bâtiments qui diffèrent d'un type de bâtiment à l'autre, la réglementation thermique prévoit la promulgation de 4 arrêtés différents relatifs aux bâtiments à usage de bureaux, à usage d'habitation, à usage de santé et à usage d'hôtellerie.

La réglementation thermique en Tunisie a été publiée par l'arrêté du 23 juillet 2008 pour les constructions à usage de bureaux [26] et par l'arrêté du 01 juin 2009 pour les constructions à usage d'habitation [27]. L'objectif est de limiter les besoins énergétiques du bâtiment liés au conditionnement d'air, tant en termes de chauffage que de climatisation, par l'amélioration des caractéristiques thermiques de son enveloppe. Pour ce faire, deux méthodes sont proposées :

L'approche dite prescriptive, qui définit les valeurs maximales à ne pas dépasser pour le coefficient de transmission de la toiture, des murs extérieurs et des baies vitrées et le coefficient de transmission solaire thermique correspondant aux fenêtres en fonction du taux global des baies vitrées (TGBV). Cette approche ne s'applique pas dans le cas où le TGBV est supérieur à 45% de la surface des murs extérieurs et/ou sa répartition 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 performance thermique du bâtiment (besoins en énergie de chauffage et de climatisation) en fonction de la zone climatique considérée.

1.3.1.3 Labels et certifications

La protection de la terre et la préservation du futur de l'humanité sont les grands sommets environnementaux, notamment Rio en 1992 et Rio+20, qui permettent au secteur de la construction de se sensibiliser à la nécessité de faire davantage d'efforts pour prendre en compte le développement durable. Ce secteur s'engage de plus en plus à construire des bâtiments dits "vertueux", consommant moins d'énergie fossile et limitant les impacts environnementaux. Les acteurs du secteur de la construction se lancent dans une démarche d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments, afin de montrer leur respect des engagements envers le développement durable. Différents outils ont été développés depuis les années quatre-vingt-dix au niveau mondial pour aider tous les acteurs à s'engager dans un processus de conception et de construction de bâtiments de haute qualité énergétique et environnementale. La mesure de ces performances se fait à l'aide d'indicateurs basés sur des labels, des certifications et des normes.

Aujourd'hui, il existe différents labels et certifications dans le secteur de l'immobilier, dont certains sont spécifiquement conçus pour les bâtiments et d'autres pour les professionnels et les artisans.

Un label est une démarche volontaire qui permet d'aller plus loin que la réglementation thermique en vigueur. L'objectif est de contrôler et d'approuver un ensemble d'éléments contribuant à atteindre une haute performance énergétique.

Un label est en mesure de certifier les performances d'un matériau, d'un artisan ou d'un bâtiment. En revanche, il n'est pas réglementé par la loi, alors que la certification l'est. Un label peut être délivré par un organisme privé tel qu'une association. Contrairement au label, la certification est encadrée par la loi. Elle vise des services, des produits ou des entreprises. Ainsi, elle peut certifier un bâtiment dont la qualité est supérieure à la réglementation en vigueur.

Les premières démarches de recherche de la qualité environnementale et de la performance énergétique des bâtiments ont été menées par les éco-architectes qui, convaincus et militants, se sont inspirés de la conception bioclimatique des années soixante-dix. Les démarches suivantes, portées par des entreprises ou des gouvernements, visent à généraliser l'utilisation de ces solutions architecturales innovantes : elles visent à promouvoir des normes et des référentiels de construction qui guident la démarche des acteurs de la construction en leur permettant de valoriser les efforts et les progrès réalisés dans la démarche qualité et performance.

Au niveau international, les normes ISO 9000 et ISO 14000 constituent la base des référentiels de management de la qualité environnementale appliquées au secteur du bâtiment. Les premières certifications de la norme ISO 9000 sont apparues dans le secteur du bâtiment en 1994, avec l'objectif de mieux contrôler la qualité de la construction. Cependant, cette démarche reste très peu déployée dans les entreprises de réalisation, car celles qui s'étaient lancées dans la certification n'y ont pas trouvé de réelle valeur ajoutée, la démarche n'étant pas reconnue par les maîtres d'ouvrage.

Ces démarches de performance des bâtiments ont été historiquement menées par certains pays anglo-saxons avant d'être adoptées par d'autres pays, notamment en Europe et dans les pays du Sud, chaque pays les ayant adoptées en fonction de ses conditions climatiques, de son environnement propre et de sa volonté politique.

Parmi les différents labels existant dans le monde, certains ont été sélectionnés et présentés de manière chronologique, comme le montre la Figure 1.7, dans la mesure où ils représentent les

labels les plus reconnus à l'échelle internationale. Ces labels et leurs approches respectives montrent les démarches de labellisation et de certification qui sont utilisées par les professionnels du secteur de la construction, tant pour la conception et la construction de nouveaux bâtiments que pour la rénovation et la réhabilitation de bâtiments existants.

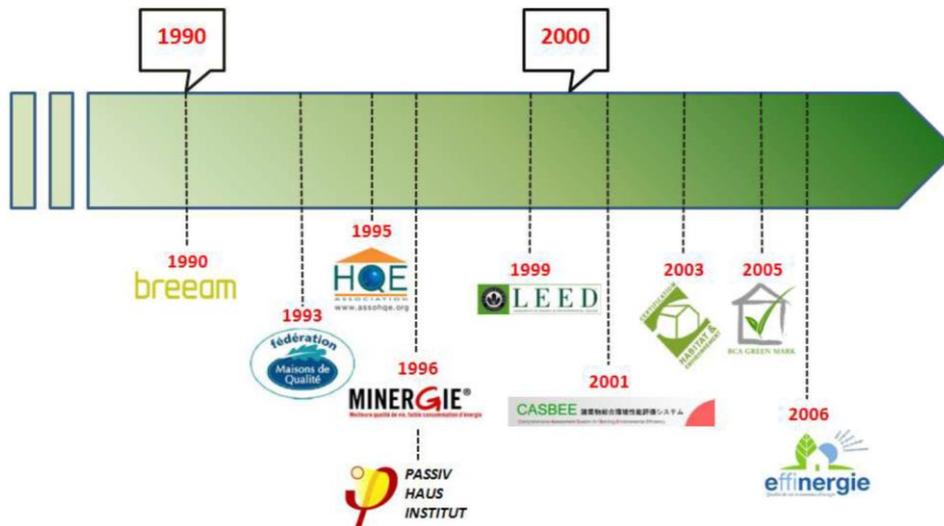


Figure 1.7. Échelle chronologique de création de quelques labels internationaux [28].

Il est à noter que les indicateurs de performance énergétique primaire comprennent les consommations de chauffage, d'eau chaude sanitaire (ECS), de climatisation, d'éclairage, de ventilation et d'auxiliaires de conditionnement d'air. La surface prise en compte est la surface hors œuvre nette (SHON).

1.3.1.3.1 BREEAM et Eco-Homes

Le label BREEAM est le premier et le précurseur dans le monde de la qualité environnementale et de la performance énergétique des bâtiments. Sa création remonte à 1990 en Angleterre, et son organisme gestionnaire est le Building Research Establishment (BRE). L'approche suivie par ce label est une approche transversale de type « système », basée sur l'attribution d'éco-points cumulés dans le cadre de l'évaluation d'un score global.

Eco-Homes est la version du BREEAM pour les maisons individuelles (Eco-Homes for New Building pour les nouvelles constructions, et Eco-Homes XB pour les maisons existantes faisant l'objet d'une rénovation ou d'une réhabilitation). Cette version est devenue le Code for Sustainable Homes, qui vise principalement la création de logements dits « zéro carbone ».

Les Anglais ont développé une procédure basée sur l'outil SAP (Standard Assessment Procedure) permettant d'évaluer la performance énergétique des bâtiments selon un processus de calcul normalisé [29]. Cet outil utilise le logiciel BREDEM (Building Research

Establishment Domestic Energy Model), qui a été utilisé pour établir la procédure d'évaluation SAP et les barèmes NHER (National Home Energy Rating).

Le logiciel NHER permet d'évaluer les logements sur la base de leur coût d'exploitation énergétique par mètre carré dans des conditions normales d'occupation, sans tenir compte du comportement individuel des occupants, pour ensuite leur attribuer une note sur une échelle de 0 à 10. Le succès de ce logiciel est principalement dû à sa conception, sa facilité d'utilisation et l'intégration de données NHER comme valeurs par défaut pour certains types de bâtiments, ce qui permet de remplir automatiquement l'ensemble des champs concernés [30].

La procédure SAP se présente sous la forme d'une échelle non linéaire de 1 à 100 et permet de calculer la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer et alimenter en eau chaude le logement. Contrairement au NHER, le SAP ne considère pas les autres utilisations de l'énergie, telles que la consommation d'électricité pour l'éclairage et les appareils électroménagers, ni les variations climatiques du Royaume-Uni. Le SAP est calculé à l'aide du modèle BREDEM-9, une version simplifiée du modèle BREDEM-12.

Bien que ce label soit le plus utilisé au monde en termes de nombre d'opérations effectuées, il s'avère que les limitations climatiques et d'usage standard, propres au milieu d'origine, entravent son utilisation dans un autre milieu, différent du milieu d'origine. L'évaluation des aspects énergétiques ne présente pas un niveau élevé, soit 21 points sur 100 dans l'évaluation globale de l'opération. De plus, l'absence d'un critère exprimant le confort d'été montre les difficultés d'adaptation de ce label dans le contexte méditerranéen.

1.3.1.3.2 Leadership in Environmental and Energy Design (LEED)

Le label LEED, utilisé aux États-Unis, au Canada et en Australie, a été créé en 1998-1999. Il a pour organismes gestionnaires les labels US Green Building Council (USGBC) pour les États-Unis et le Canada Green Building Council (CaGBC) pour le Canada. La démarche était initialement dédiée aux nouveaux bâtiments commerciaux, mais elle est désormais disponible pour tout type de bâtiment, mettant en œuvre l'évaluation intégrale du bâtiment tout au long de son cycle de vie.

La méthode d'évaluation des bâtiments de ce label permet l'attribution d'un score calculé sur la base de 34 cibles réparties en cinq grandes familles. L'importance de l'approche énergétique est élevée, soit 17 points sur un total de 69. Il s'agit d'une application directe des normes de l'ASHRAE, telles que la norme 55 relative au confort thermique, la norme 62 relative à la ventilation et à la qualité de l'air et la norme 90 relative à la consommation d'énergie.

En effet, ce label ne prend pas en compte les facteurs liés à l'environnement local, comme la température extérieure moyenne. Il se réfère également aux normes américaines (ASHRAE, ASTM, ANSI), qui n'incluent pas de critères de confort d'été, ce qui limite son adéquation aux pays chauds.

La certification LEED n'exige pas l'utilisation de technologies innovantes, mais s'appuie plutôt sur l'existant, et les solutions techniques utilisées dépendent de la région et du climat, de sorte qu'elle ne pose aucune difficulté dans l'environnement d'origine. En revanche, le fait que ce label soit basé sur des normes d'efficacité énergétique liées à des produits ou équipements du pays d'origine nécessite, en cas de transfert de ce label vers d'autres pays, de transporter en même temps les produits et les équipements en question. Par ailleurs, la certification LEED étant très souvent portée par la maîtrise d'ouvrage, avec l'application de la procédure de commissionnement dès la phase de conception, elle permet de réduire les aléas de mise en œuvre sur le terrain et d'assurer la qualité des bâtiments.

La mise en place de ce label est applicable dans tous les environnements extérieurs. Les architectes/ingénieurs conçoivent donc l'enveloppe et les systèmes techniques pour répondre aux exigences minimales de la certification. Le système de points attribué, lorsque les projets atteignent ou dépassent les exigences techniques de chacune des cinq catégories (conception écologique du site, utilisation rationnelle de l'eau, énergie et atmosphère, matériaux et ressources, et qualité de l'environnement intérieur), doit constamment évoluer conformément à la réglementation afin de promouvoir les économies d'énergie.

Le processus d'évaluation de ce label comporte trois étapes, la première étant l'enregistrement du projet auprès de l'USGBC. La deuxième est la mise à disposition d'un support technique et d'un accès à la banque pour suivre le projet pendant la phase de réalisation, à partir de laquelle le bâtiment sera certifié par l'USGBC s'il répond aux critères de performance des cinq catégories mentionnées ci-dessus. Enfin, l'apposition d'une plaque de label sur le bâtiment. Notons qu'il existe quatre niveaux de certification : certifié (26-32 points), argent (33-38 points), or (39-51 points) et platine (52 points ou plus).

Selon une étude portant sur 33 projets, le surcoût de la certification est en moyenne de 2% par rapport à un bâtiment qui ne respecte que les normes environnementales de construction [31], avec une réduction moyenne de la consommation d'énergie de 28%. Il s'agit d'un succès économique qui justifie le transfert de ce label.

1.3.1.3.3 Minergie

Le label Minergie est un programme suisse dédié au confort des bâtiments, à l'efficacité énergétique et au maintien de la valeur du patrimoine immobilier. Il a été créé en Suisse en 1996, et comporte trois branches :

- ✓ Minergie standard ;
- ✓ Minergie P (Passif) ;
- ✓ Minergie-Eco (Minergie avec des matériaux écologiques, en tenant compte du volet santé).

L'organisme de gestion de ce label est l'Association Minergie (AMI). Le label a adopté une approche mixte système/produit, reposant davantage sur la filière Minergie-Eco, et une clé d'entrée fortement axée sur l'objectif énergétique. La finalité centrale du label est de réduire d'un facteur 3 la consommation d'énergie par rapport aux bâtiments traditionnels.

Ce label a conduit à la réalisation d'environ 7000 bâtiments ayant la certification Minergie. Ces bâtiments sont aussi bien résidentiels que non résidentiels. Un peu moins de 10% des bâtiments labellisés sont des bâtiments existants.

L'obtention du label Minergie standard implique que les bâtiments résidentiels ne doivent pas dépasser une consommation d'énergie primaire de 42 kWhep/(m²SHON.an) pour les nouvelles constructions et de 80 kWhep/(m²SHON.an) pour les constructions existantes. Quant au label Minergie P, qui est l'équivalent rédactionnel des exigences du standard Passive House, les bâtiments ne doivent pas dépasser 30 kWhep/(m²SHON.an) pour les nouvelles constructions, dont les besoins en chauffage sont inférieurs à 15 kWhep/m².an. Enfin, le label Minergie-Eco, qui vient d'être lancé, est destiné à l'évaluation des performances écologiques [31].

Les bâtiments Minergie ne doivent pas présenter un surinvestissement de plus de 10% par rapport à un bâtiment conventionnel. Dans la pratique, les chiffres se situent autour de 5%. La marque est reconnue sur le marché, ce qui confère aux maisons Minergie une valeur supérieure aux autres maisons lors de la revente.

Le slogan de l'association Minergie est « meilleure qualité de vie, faible consommation d'énergie ». Les bâtiments Minergie doivent être équipés d'une ventilation douce (ventilation mécanique), la qualité de l'air et l'absence d'humidité dans un pays où la ventilation mécanique était peu développée. En revanche, l'absence de critères de confort d'été, la négligence de la localisation géographique et l'obligation d'utiliser une ventilation double flux avec récupération

de chaleur, constituent un sérieux problème pour l'extension de ce label à la zone méditerranéenne.

1.3.1.3.4 Passiv'Haus

Le label Passivhaus est un standard allemand de performance énergétique des bâtiments. Il a été créé en 1996 par le Dr Wolfgang Feist et géré par le Passiv'Haus Institut Darmstad. Ce label vise à promouvoir la construction de bâtiments à très faible consommation d'énergie. Il a conduit à la réalisation d'environ 7000 bâtiments en Allemagne, ainsi qu'en Autriche et, dans une moindre mesure, dans d'autres pays. Les bâtiments labellisés Passivhaus permettent de réaliser des économies d'énergie allant jusqu'à 90% par rapport aux bâtiments conventionnels.

Les techniques de construction utilisées par ce label sont basées sur les concepts d'architecture bioclimatique, notamment pour l'enveloppe du bâtiment, c'est-à-dire des formes compactes avec des fenêtres orientées au sud, des espaces tampons pour les parties nord de la maison, un système de chauffage collectif à eau chaude avec des chaudières à condensation et une utilisation importante du solaire thermique et du photovoltaïque. Le concept de maison passive consiste à minimiser les pertes de chaleur dans le bâtiment, avec la plus grande étanchéité à l'air possible, en exploitant de manière optimale l'énergie fournie par le soleil.

L'obtention du label Passivhaus repose sur des spécifications précises, à savoir :

- ✓ La consommation de chauffage doit être inférieure à $15 \text{ kWhep/m}^2 \cdot \text{an}$. Cette mesure est jugée suffisante pour chauffer un bâtiment en bon état grâce au soleil et à la récupération de la chaleur interne ;
- ✓ L'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment doit être $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$. Cela signifie que l'habitat doit être suffisamment étanche pour conserver la chaleur à l'intérieur de la maison ;
- ✓ Les besoins en énergie primaire doivent être inférieurs à $120 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \text{ SHON} \cdot \text{an})$.

D'un point de vue technique, ces maisons combinent généralement des épaisseurs d'isolation de 30 à 40 cm, du triple vitrage et une ventilation double flux avec récupération. Le chauffage étant très souvent assuré par un apport de chaleur sur le système de ventilation, l'utilisation d'un réseau de distribution spécifique ne se justifie plus.

Si ce label intègre bien la consommation de climatisation, l'absence de critères de confort d'été, le manque de considération de la situation géographique, les calculs de consommation d'énergie sont réalisés à partir des mêmes données climatiques pour toute l'Allemagne, et le surcoût élevé pour les bâtiments Passiv'Haus (à hauteur de 150 à 250 €/m²)... montrent néanmoins qu'une

extension de ce label en milieu méditerranéen serait difficile, d'autant plus pour le test d'étanchéité n'est pas très connu dans ce territoire.

1.3.1.3.5 Ordonnance solaire thermique (OST)

L'OST est une démarche qui a vu le jour à Barcelone en 1999. Cette ordonnance a été mise en place dans une ville méditerranéenne, dans la région de Catalogne, en plein essor économique. Elle a établi une couverture solaire minimale des besoins en eau chaude sanitaire (ECS) dans certains types de bâtiments. Ensuite, elle a été révisée en 2006 pour élargir son champ d'application.

En effet, les premières versions de l'OST concernaient tous les bâtiments neufs et certaines réhabilitations. La révision de 2006 a étendu les types d'usage concernés à tous les bâtiments dans lesquels de l'eau chaude sanitaire est consommée. De plus, la mise en place de capteurs solaires thermiques n'était exigée que pour les consommations supérieures à 81 kWh/j en moyenne pour la production d'ECS. Aujourd'hui, cette obligation est étendue à tous les bâtiments dans la limite de leur consommation énergétique pour la production d'ECS. La mise à jour de l'OST 2006 devient ainsi plus exigeante.

Il faut savoir que l'Espagne est un État fédéral. De ce fait, la Catalogne et la ville de Barcelone sont donc habilitées à faire leurs propres lois. Ce système donne intrinsèquement une autonomie dans la création d'un texte réglementaire tel que l'ordonnance solaire thermique, ainsi que le pouvoir et les moyens de le faire appliquer, tout en respectant l'application de la norme nationale, dite « CTE ».

« Le Code Technique de la Construction (CTE) est le cadre normatif qui établit les exigences que doivent respecter les bâtiments en ce qui concerne les conditions basiques de sécurité et habitabilité établies dans la Loi 38/1999 du 5 novembre, d'Aménagement de la Construction (LOE). »

Selon le CTE, il existe quatre prescriptions énergétiques, qui sont basées sur la limitation des besoins énergétiques des bâtiments, qu'ils soient neufs ou réhabilités, sans imposer de limites quantitatives. Deux approches sont proposées : une méthode simplifiée, qui repose sur la maîtrise indirecte des besoins énergétiques par la limitation des paramètres caractéristiques de l'enveloppe (facteur solaire, inertie, perméabilité à l'air, etc.) et une méthode générale, basée sur l'évaluation des besoins énergétiques par comparaison avec un bâtiment de référence, modélisé avec le logiciel Lider.

La première exigence concerne l'enveloppe du bâtiment : c'est la limitation de la consommation énergétique par des critères architecturaux (exposition, taille des ouvertures...) et des critères structuraux (inertie, résistance thermique des parois...). Les limites pour les coefficients de déperdition thermique de l'enveloppe ainsi que pour les facteurs solaires des vitrages sont établies en fonction de la zone climatique considérée.

La deuxième exigence concerne la limitation de la consommation énergétique de l'éclairage par des systèmes efficaces, à savoir des ouvertures adéquates, des luminaires à faible consommation énergétique dimensionnés en fonction des besoins réels d'éclairage, avec un système de régulation permettant d'optimiser l'apport de lumière naturelle. Les bâtiments doivent donc être équipés de systèmes d'éclairage qui répondent aux besoins des utilisateurs.

La troisième exigence concerne le solaire thermique : une couverture solaire thermique minimale des besoins énergétiques en ECS doit être mise en place par l'installation de capteurs solaires thermiques à basse température. En d'autres termes, les bâtiments doivent être équipés d'une installation thermique appropriée, qui permet d'assurer un confort thermique satisfaisant tout en régulant la puissance thermique. Il s'agit de couvrir au moins 60% de la demande en ECS, avec une contribution plus importante lorsque la consommation d'ECS dépasse 10 000 l/jour ou lorsque le système d'appoint est électrique. La demande en ECS est calculée selon des tableaux de consommation type, en fonction de la destination du bâtiment et d'un indicateur caractéristique de sa taille.

La quatrième exigence consiste à mettre en place une couverture solaire photovoltaïque minimale (capteurs) pour certains bâtiments.

Bien que le CTE considère la situation géographique, il est limité aux zones climatiques espagnoles et ne traite que des coefficients de déperdition de l'enveloppe, sans tenir compte du confort d'été et de la climatisation, avec un coût élevé des panneaux solaires photovoltaïques. Ces raisons montrent les difficultés d'étendre le label espagnol à la région de la Méditerranée orientale.

1.3.1.3.6 Labels énergétiques en France

1.3.1.3.6.1 Haute Qualité Environnementale (HQE)

Le label HQE est un concept environnemental qui a vu le jour au début des années quatre-vingt-dix, doté d'un référentiel comprenant 14 cibles. Il recommande de prendre en compte l'aspect environnemental à toutes les étapes de l'élaboration et de la vie des bâtiments (conception, matériaux, construction, vie, réhabilitation, rénovation, etc.). Il permet la labellisation et la

certification des bâtiments, la vérification de l'application des technologies ayant le moindre impact sur l'environnement et l'utilisation de sources d'énergie alternatives pour une meilleure efficacité énergétique.

Le projet du label a été initié par l'association HQE, reconnue d'utilité publique en 2004. Elle s'est donnée pour mission d'anticiper et d'initier la réflexion sur l'environnement, ainsi que de contribuer au développement de l'excellence des territoires et des pratiques professionnelles. Elle intervient pour porter et défendre l'intérêt général des acteurs au niveau local et international.

Contrairement aux labels français, ce label a été déposé comme une marque par une association. La haute qualité environnementale est définie en termes de coût global, incluant idéalement un bilan énergétique et carbone ainsi qu'un cycle de maintenance et de renouvellement. Le label HQE est donc une bonne représentation du respect de l'environnement dans le domaine de la construction.

Afin d'obtenir le label HQE, le bâtiment doit respecter les 14 cibles en vigueur, c'est-à-dire les critères d'évaluation auxquels le bâtiment doit répondre pour obtenir ce label. Ces cibles permettent une meilleure perception des facteurs qui influencent l'environnement. Elles se répartissent entre la volonté de créer un environnement intérieur satisfaisant en maîtrisant les impacts éventuels sur l'environnement extérieur.

1.3.1.3.6.2 Effinergie+

Le collectif effinergie a été créé en 2006 par des pionniers de l'efficacité énergétique, notamment les Régions, qui constituent la force majeure de l'association. En 2007, l'association a lancé le premier label effinergie, qui est devenu BBC-effinergie grâce à l'intégration de ce label dans la réglementation thermique française [32]. Cette association avait raison, dans la mesure où le label a connu un grand succès avant d'être généralisé dans la réglementation thermique.

Ce label a pour objectif de limiter la consommation moyenne d'énergie primaire à 50 kWhep/(m²SHON.an). Il exige en outre une amélioration du Bbio,max (les besoins bioclimatiques du bâtiment) et du Cep,max (la consommation conventionnelle d'énergie primaire) de 20%. A l'exception des bureaux et des commerces, où le Cep,max doit être amélioré d'environ 40%. L'étanchéité à l'air ne doit pas dépasser 0.4 m³/h.m² en maison individuelle, 0.8 m³/h.m² en logement collectif et 1.2 m³/h.m² en tertiaire de moins de 3000 m².

Il est également conseillé de prendre en compte le confort d'été, visuel, acoustique et la qualité de l'air intérieur ainsi que l'énergie grise du bâtiment [33].

1.3.1.3.6.3 Bepos Effinergie 2013

Le label BEPOS-Effinergie a été délivré par Cerqual, Certivéa, Prestaterra et Promotelec. Il vise à contribuer à la conception de bâtiments à énergie positive, objet de la future réglementation thermique 2020. Ce label pilote, applicable à court terme, s'appuie sur la RT 2012 et le label effinergie+. Il marque un changement de modèle et une étape vers la généralisation de Bepos. Ce label est disponible pour tous les bâtiments soumis à la RT 2012. Pour les autres types de bâtiments, une procédure de dérogation peut être demandée à Effinergie et Certivéa.

La consommation d'énergie primaire non renouvelable entrant dans le projet, à laquelle on soustrait la production locale d'énergie sortant du projet, doit être inférieure ou égale à un écart autorisé. Pour ce faire, il faut multiplier l'énergie entrante et sortante par les facteurs de conversion de l'énergie primaire non renouvelable définis dans le référentiel [34].

1.3.1.3.6.4 HPE Rénovation

Le label « Haute Performance Energétique Rénovation » permet de reconnaître la démarche volontaire des maîtres d'ouvrage qui souhaitent réaliser un projet de rénovation économe, voire très économe, en énergie. Son utilisation par les maîtres d'ouvrage leur permet d'anticiper les objectifs du Grenelle de l'environnement à l'horizon 2020 pour les bâtiments existants.

Ce label constitue un moyen de prouver un niveau de consommation énergétique, qui peut être utilisé pour obtenir des subventions telles que l'éco-prêt à taux zéro ou l'éco-prêt logement social. Il ne s'applique qu'aux bâtiments achevés après le 1^{er} janvier 1948.

Ce label exige, pour les bâtiments résidentiels, un niveau HPE Rénovation qui correspond à une consommation d'énergie primaire de 150 kWh_{ep}/(m²SHON.an), modulée en fonction de la zone climatique et de l'altitude [35]. Dans le cas des bâtiments non résidentiels, il existe d'autres niveaux de performance qui sont bien définis dans la section de la rénovation des bâtiments à basse consommation d'énergie, « BBC rénovation ».

1.3.1.3.6.5 Bâtiment Basse Consommation (BBC)

Le label BBC est un label d'Etat. Cette norme fait partie de la réglementation thermique française pour les constructions neuves et les rénovations. Ces logements ont des besoins énergétiques très faibles. Plusieurs certificateurs agréés délivrent ce label. C'est notamment le cas d'Effinergie, une association qui œuvre pour la promotion de l'efficacité énergétique des

bâtiments. L'objectif de cette mesure est de réduire la consommation des logements en améliorant leur isolation, leur système de ventilation ou leur étanchéité à l'air.

Ce label fixe, pour les bâtiments résidentiels neufs, une exigence énergétique importante, qui correspond à une consommation d'énergie primaire de 50 kWhep/(m²SHON.an), telle que définie par la RT 2012. Pour les bâtiments tertiaires, la consommation de référence doit être calculée en fonction de chaque situation. Cette exigence est corrigée par un coefficient de « rigueur climatique », en fonction de la zone climatique de la RT 2005. Ce coefficient est augmenté de 0.1 si l'altitude du bâtiment est comprise entre 400 et 800 mètres, et de 0.2 si l'altitude du bâtiment est supérieure à 800 mètres. Les valeurs de l'exigence peuvent donc varier, selon la zone et l'altitude, de 40 à 75 kWhep/(m²SHON.an).

Contrairement à la construction neuve, la rénovation représente le plus grand potentiel d'économie d'énergie, l'objectif de consommation dans ce contexte est de 80 kWhep/(m²SHON.an), « BBC-Rénovation 2009 ». Ce besoin énergétique est corrigé par le même coefficient de rigueur climatique, comme BBC 2005 [36].

1.3.2 A l'échelle marocaine (RTCM)

De nos jours, la réglementation thermique est devenue l'un des moyens fondamentaux pour faire face à la crise énergétique qui menace la planète, notamment l'augmentation de la consommation d'énergie, qui ne sert à rien d'autre qu'à servir l'être humain. Les codes énergétiques représentent un outil important pour inciter à l'amélioration de la performance énergétique du parc immobilier et à la réduction des émissions de carbone.

Au Maroc, la réglementation thermique a vu le jour par la publication du décret n° 2-13-874 du 15 octobre 2014 au bulletin officiel n° 6306 du 06 novembre 2014 [37]. Ce décret approuve le règlement général de construction fixant les règles de la performance énergétique des bâtiments et instituant le Comité national pour l'efficacité énergétique du bâtiment. Cette réglementation a été élaborée par l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique (AMEE, ex ADEREE), intitulée « Réglementation Thermique de la Construction au Maroc (RTCM) », qui a pour objectif d'améliorer principalement la performance énergétique des nouveaux bâtiments [6]. Dans le secteur de l'habitat, des économies d'énergie finales d'environ 22 kWh/m².an peuvent être réalisées, selon la zone climatique considérée, à condition que les exigences prescrites soient respectées.

La RTCM a été officiellement mis en application le 6 novembre 2015. Son application est fondée sur un zonage climatique, établi à partir de l'analyse des données climatiques

enregistrées par 37 stations météorologiques sur la période 1999-2008 (10 ans), qui a été réalisée en étroite coordination entre la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et l'AMEE. Le territoire marocain a été subdivisé en six zones climatiques, sur la base du nombre de degrés-jours d'hiver et le nombre de degrés-jours d'été.

Afin de pouvoir appliquer facilement et efficacement les dispositions de ce règlement, une carte de zonage a été établie selon les six zones climatiques concernées, comme le montre la Figure 1.8. Ce zonage climatique a été réalisé par des experts internationaux à l'aide de fichiers climatiques horaires annuels, sur la base des résultats de simulations des besoins annuels de chauffage et de climatisation d'un bâtiment type dans onze villes marocaines représentatives, comme le montre la Figure 1.9.

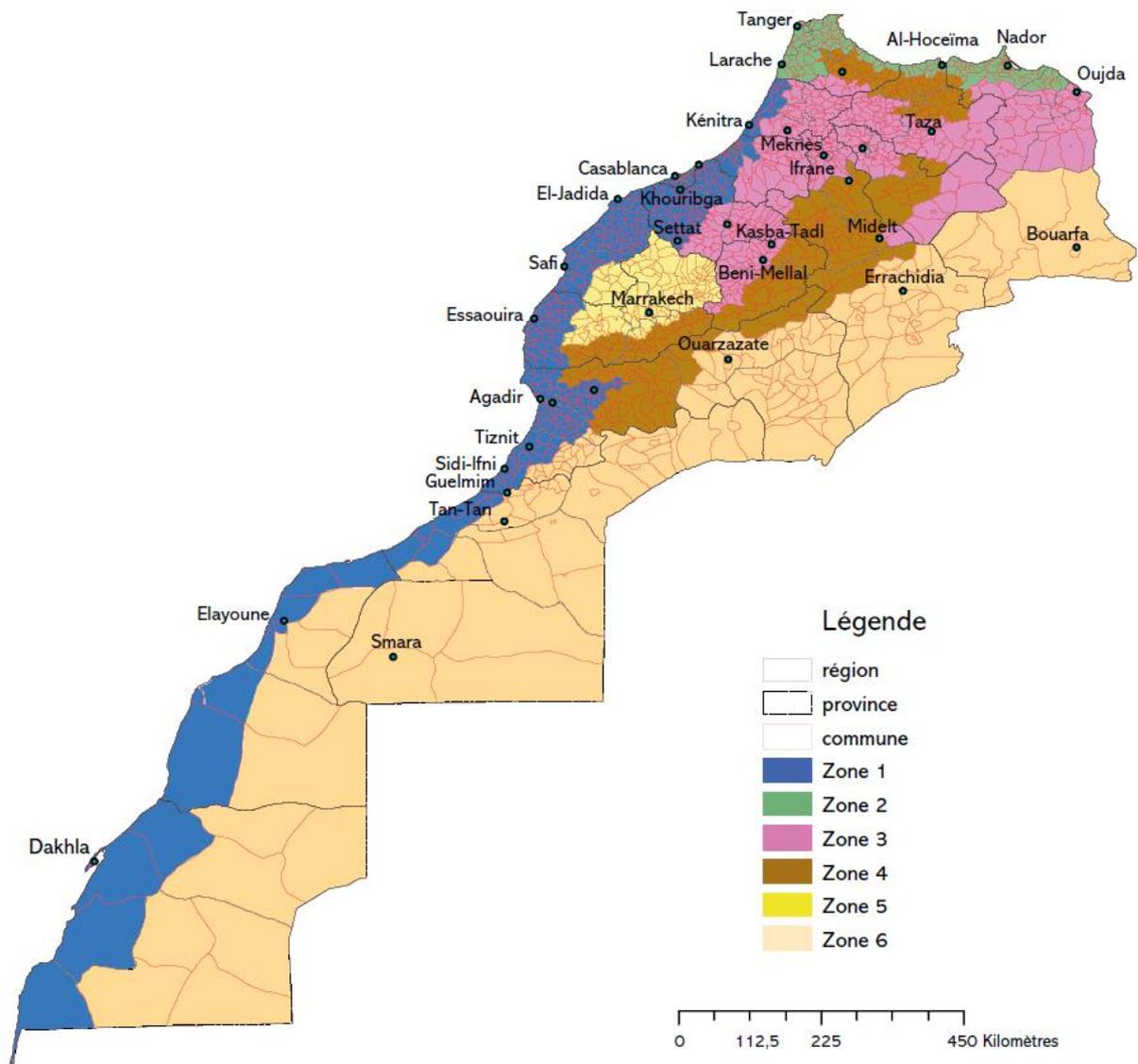


Figure 1.8. Carte du zonage climatique du Maroc [6].

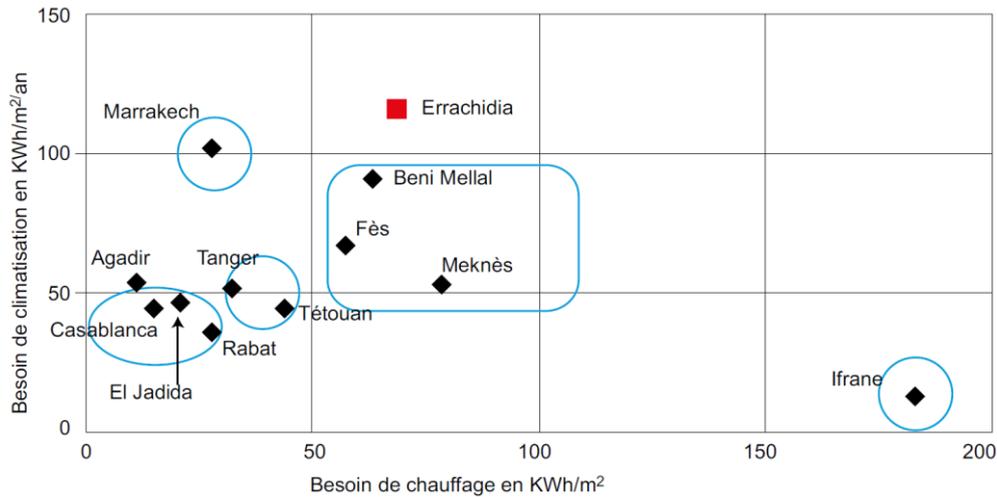


Figure 1.9. Besoins énergétiques spécifiques en matière de chauffage et de climatisation pour chaque zone climatique [6].

La RTCM définit des exigences à respecter pour la conception des bâtiments neufs, selon la zone climatique et le type de bâtiment, soit résidentiel ou tertiaire. À cette fin, l'une des approches suivantes doit être considérée pour l'étude de conformité réglementaire [6] :

L'approche dite performantielle définit les besoins énergétiques maximaux de conditionnement du bâtiment, correspondant à la somme des besoins annuels de chauffage et de climatisation, exprimés en kWh/m².an, selon la zone climatique et le type de bâtiment considéré (voir Tableau 1.2). Le calcul de ces besoins doit être conforme aux dispositions de la norme marocaine NM EN 15265, ainsi qu'aux normes EN 12831 et ANSI/ASHRAE/ACCA standard 183 - 2007. Ces besoins peuvent être calculés par des outils numériques dédiés à la simulation thermique dynamique, tels que TRNSYS, Pleiades, EnergyPlus, DesignBuilder, etc.). Le dimensionnement des équipements de chauffage et de climatisation dans les bâtiments nécessite des conditions intérieures de référence en termes de température et d'humidité. Les températures intérieures de référence pour le chauffage et la climatisation sont respectivement de 20°C et 26°C. Pour l'humidité, les valeurs de référence sont respectivement de 55% et 60% pour l'hiver et l'été. Ces conditions intérieures de calcul sont conformes aux dispositions de la norme marocaine NM ISO 7730 [38].

Tableau 1.2. Besoins spécifiques thermiques annuels maximaux de chauffage et de climatisation en kWh/m².an.

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

L'approche dite prescriptive consiste à fixer des spécifications techniques exprimées, selon la zone climatique et le type de bâtiment, sous la forme de coefficients limites de transmission thermique surfacique (U) de plusieurs parties de l'enveloppe du bâtiment. Ces parties sont les toitures, les murs extérieurs, les planchers sur pilotis, les baies vitrées (y compris le facteur solaire équivalent des baies vitrées et l'effet de la protection solaire) et la résistance thermique (R) des planchers, en fonction du taux global des baies vitrées (TGBV) (voir Annexe 1-A et Annexe 1-B). L'utilisation de vitrages teintés, réfléchissants ou spéciaux est requise lorsque les protections solaires extérieures ne peuvent être considérées ou sont insuffisantes. Cette approche n'est applicable que lorsque le TGBV est inférieur ou égal à 45%. Ces spécifications techniques peuvent être calculées par des formules statiques facilement programmables sous Excel ou par des outils spécifiques tels que le logiciel BINAYATE Prescriptive développé par l'AMEE.

La réglementation thermique marocaine a également défini des exigences limites pour le coefficient de performance des pompes à chaleur en fonction du mode de fonctionnement et du type de système utilisé (voir Tableau 1.3). Où COP est le coefficient de performance et EER est le niveau d'efficacité énergétique.

Tableau 1.3. Valeurs réglementaires des performances énergétiques minimales [38].

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

Depuis la publication du Bulletin officiel n°6874 en avril 2020 [39], il est devenu obligatoire d'établir une note technique par les concepteurs du projet, indiquant la conformité des constructions à édifier avec les règles de performance énergétique précisées dans la RTCM. Cette note technique représente un élément clé pour l'octroi du permis de construire.

1.4 Paramétrage des volets énergétiques dans le bâtiment

La situation énergétique présentée dans la section 1.2 montre que les bâtiments consomment une part importante de l'énergie et, en conséquence, sont à l'origine d'une part importante de la pollution. Cette énergie est utilisée à de nombreuses fins, notamment le chauffage et/ou le refroidissement, pour assurer un climat intérieur confortable, la circulation de fluides tels que l'air (ventilation), l'eau (eau chaude, chauffage), le transport (ascenseurs), l'éclairage, les

communications (téléphone, radio, télévision) et la production de biens (fabriques, cuisines, couture, etc.).

Dans les climats tempérés et froids, la majeure partie de l'énergie utilisée par un bâtiment est destinée au chauffage. Le flux de chaleur généré dans le système de chauffage aboutit inévitablement à l'extérieur par diverses voies plus ou moins directes.

Dans les climats plus chauds, il peut être nécessaire, et certainement confortable, d'abaisser la température à l'intérieur du bâtiment. Ce refroidissement et l'assèchement de l'air (dans les zones tropicales) peuvent également être de gros consommateurs d'énergie.

Afin de pouvoir maîtriser le climat intérieur du bâtiment après sa construction, il faut penser, en amont de sa construction, à procéder à un paramétrage approprié de chacun de ses volets, tant passif qu'actif.

1.4.1 Volet passif

Le volet passif est défini, dans ce rapport de thèse, comme un ensemble de paramètres qui ont indirectement un impact positif ou négatif sur la performance énergétique du bâtiment.

1.4.1.1 Emplacement du bâtiment

L'emplacement du bâtiment joue un rôle important dans la maîtrise des impacts de l'environnement extérieur sur les performances énergétiques du bâtiment. Afin de choisir cet emplacement, plusieurs paramètres entrent en jeu, tels que [40] :

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

Ces paramètres sont spécifiques et uniques à l'emplacement du bâtiment. Toutefois, ils sont généralement considérés comme fixes pour les études énergétiques.

1.4.1.2 Architecture du bâtiment

Les paramètres de conception architecturale, tels que la surface des fenêtres, la compacité, la distribution et le nombre de pièces dans le bâtiment, sont liés aux exigences du maître d'ouvrage

et à l'innovation de l'architecte. Ces exigences sont souvent spécifiques à chaque bâtiment. Certains paramètres architecturaux peuvent être discutés avec l'architecte du point de vue énergétique lors des échanges d'avant-projet, tels que la surface des fenêtres dans le cas de la conception de bâtiments neufs. En raison du coût élevé de l'agrandissement ou du raccourcissement des fenêtres (changement des linteaux, maçonnerie, etc.), la surface des fenêtres demeure souvent la même dans le cas de la réhabilitation de bâtiments existants.

Il convient de noter que généralement, l'orientation des façades Nord/Sud est la plus optimale, dans la mesure où elle permet de bénéficier du rayonnement solaire en hiver, réduisant ainsi les besoins en chauffage, et atténuant les surchauffes en été [41]. De plus, l'orientation est souvent limitée par le choix du terrain (quartier déjà aménagé).

1.4.1.3 Enveloppe du bâtiment

L'enveloppe d'un bâtiment correspond à la notion de clos et de couvert tant au niveau de la couverture que des façades ou des parties enterrées. Elle représente l'interface entre un espace interne, qui doit satisfaire les besoins de confort et de protection de ses occupants, et un espace externe, qui présente de l'inconfort et des risques. Elle est donc soumise à de multiples actions pour lesquelles la pérennité de ses performances doit être assurée.

Afin d'améliorer la performance énergétique d'un bâtiment tout en réduisant les effets des gaz à effet de serre, une attention particulière doit préalablement être accordée à son enveloppe [42].

Dans la majorité des pays, la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment a été significativement négligé [7]. Si des succès considérables ont été enregistrés en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements d'éclairage, de chauffage et de climatisation, de nombreux bâtiments en construction sont encore très énergivores.

Il est important de préciser qu'une bonne enveloppe de bâtiment permet d'offrir à ses occupants une protection durable contre les intempéries extérieures (vent, froid, pluie, gel, chaleur, etc.). En hiver, elle minimise les pertes de chaleur vers l'extérieur tout en maximisant les apports d'énergie solaire à travers les parois vitrées. En revanche, en été, une bonne enveloppe permet de maintenir une certaine fraîcheur à l'intérieur du bâtiment. De plus, une bonne enveloppe est un moyen efficace d'améliorer le confort intérieur des occupants tout en minimisant l'impact de la construction sur l'environnement (matériaux écologiques, intégration paysagère, réduction des nuisances sonores).

Dans les bâtiments neufs comme dans les bâtiments existants, l'enveloppe du bâtiment est un levier d'intervention prioritaire. Néanmoins, dans le cas des bâtiments existants, l'amélioration

de la performance énergétique de l'enveloppe représente parfois des investissements très élevés compte tenu des différentes contraintes potentielles (architecturales, techniques, légales, etc.). Dans ce cas, un choix d'équipements techniques très performants (chauffage, production d'eau chaude sanitaire, ventilation, etc.) pourrait être une voie plus économique pour réduire la consommation d'énergie par rapport à la situation initiale.

Cette enveloppe est composée de plusieurs éléments, dont principalement les murs, le plancher haut, le plancher bas, les ouvertures, et les protections solaires optionnelles. Les paramètres de l'enveloppe sont liés à ses éléments constructifs.

1.4.1.3.1 Parois opaques

Les parois opaques sont principalement composées de murs, de la toiture, des combles et du plancher. Elles jouent un rôle fondamental dans toute stratégie visant à améliorer la performance énergétique des bâtiments, dans la mesure où elles constituent une zone de contact entre l'intérieur et l'extérieur.

La majorité des parois opaques sont construites avec des murs en bois, en charpente métallique, en béton ou en briques. Elles sont caractérisées par différents paramètres thermo-physiques, notamment le coefficient de transmission thermique (U), la capacité thermique (C), la densité (ρ) et le coefficient d'absorption solaire (α). Le coefficient U représente un facteur clé, susceptible de générer un impact positif ou négatif sur la performance énergétique des bâtiments, dans la mesure où il permet de quantifier le flux d'énergie traversant un milieu, par unité de surface, de volume ou de longueur. Pour le minimiser, la solution la plus évidente est d'ajouter des matériaux isolants, or cela n'a jamais été un choix judicieux [43].

Les exigences minimales du coefficient de transmission thermique sont définies par les règlements thermiques et par les labels, comme présenté dans la section 1.3. Elles varient entre 0.15 comme valeur limite minimale et 1.25 comme valeur limite maximale selon le référentiel considéré.

La capacité thermique est la capacité d'un matériau à absorber, stocker et restituer la chaleur. Dans le bâtiment, face à la variation de la température diurne et nocturne, les impacts thermiques périodiques du rayonnement solaire sur les parois génèrent le phénomène de l'inertie thermique qui correspond à la mise en œuvre de cette capacité thermique.

L'inertie thermique d'un matériau est évaluée à l'aide de deux paramètres principaux, à savoir la diffusivité et l'effusivité thermique, qui dépendent tous les deux de la conductivité thermique, de la capacité thermique et de la densité. Pour une inertie thermique favorable, il est impératif

de garantir une faible diffusivité thermique, afin que l'échange d'énergie thermique entre le climat extérieur et le climat intérieur se fasse le plus lentement possible, et une effusivité thermique élevée afin que la paroi emmagasine le maximum de fraîcheur dans les éléments en contact avec l'intérieur du bâtiment.

Il convient de noter que pour avoir un stockage thermique efficace, la variation de la température ambiante diurne doit dépasser 10°C [42]. Des études ont montré que le passage d'une faible à une forte inertie peut réduire la demande de chauffage d'environ 10% et la demande de climatisation de 20% [44].

L'absorption solaire est un phénomène naturel par lequel la matière capte les photons du rayonnement solaire et les transforme en chaleur. Dans le bâtiment, cette opération se fait à travers les parois opaques en absorbant le maximum de chaleur dans les climats froids ou en réfléchissant le maximum de rayonnement solaire dans les climats chauds. Dans les climats tempérés, un compromis doit être envisagé. L'efficacité du mécanisme d'absorption solaire est également liée à l'isolation et aux matériaux utilisés dans les parois.

Le coefficient d'absorption solaire peut varier de 0.1 à 0.9 selon le type et la couleur du matériau utilisé. La valeur 0.1 correspond à une couleur blanche pure. Alors qu'une valeur élevée de 0.9 correspond à une couleur noire foncée. Certains pays, comme les États-Unis, ont introduit des exigences concernant le coefficient de réflexion solaire dans les réglementations thermiques et les labels. Par exemple, pour les parois à faible pente (toiture), la réflexion solaire doit être supérieure à 0.65 pour les bâtiments neufs et à 0.5 pour les bâtiments existants [45]. Un bon choix du coefficient d'absorption des parois opaques et surtout de la toiture peut offrir des économies d'énergie allant jusqu'à 13% [46] et une réduction de 45% des degrés heures d'inconfort estival [47].

1.4.1.3.2 Ouvertures

Les ouvertures de l'enveloppe, qu'il s'agisse de fenêtres, de portes ou de toute autre ouverture, jouent un rôle primordial pour le confort thermique, visuel et acoustique. Elles possèdent un impact énorme en matière de transfert de flux de chaleur, qu'il soit négatif ou positif sur la performance énergétique du bâtiment. En outre, elles sont également importantes d'un point de vue esthétique pour l'architecture du bâtiment.

Les fenêtres se composent généralement d'une partie dite vitrage et d'une partie dite cadre. Les vitrages les plus utilisés dans le monde au cours de cette dernière décennie sont les vitrages simples et doubles avec un cadre en aluminium ou en PVC [48].

Généralement, dans les climats chauds ou dans les pays en développement, la plupart des fenêtres existantes ne sont pas assez performantes. Elles ont une faible résistance thermique et sont extrêmement sensibles au rayonnement solaire. Ces dernières années, certains pays membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) caractérisés par un climat froid ont commencé à utiliser des fenêtres à double vitrage, à faible émissivité et dotées de cadres à faible transmission. Les fenêtres isolées sont particulièrement importantes dans les climats froids, mais sont également nécessaires dans les climats chauds. Les caractéristiques solaires et optiques des vitrages doivent en effet être optimisées de manière saisonnière en fonction du climat.

Les vitrages sont caractérisés par un coefficient de transmission thermique (U_g), un facteur solaire (FS) et un coefficient de transmission lumineuse (τ_l). Ces dernières années, les technologies du vitrage ont connu des évolutions significatives telles que les vitrages isolés, comme par exemple le cas du double vitrage avec une couche de gaz entre les vitres, tel que l'Argon, le Xénon ou le Krypton, les vitrages à contrôle solaire, les vitrages à faible émissivité, etc... [49]. Des fenêtres à haute performance sont également apparues comme les fenêtres pariétodynamiques et les vitrages aérogels qui présentent une très faible transmission thermique qui varie entre 0.1 et 0.5 W/m².K [50], [51].

Le choix des caractéristiques thermo-physiques du vitrage mentionnées ci-dessus a un impact très important sur la performance énergétique [52]. Ceci explique le fait que plusieurs prescriptions combinant ces caractéristiques sont définies dans les différentes réglementations thermiques et labels décrits dans la section 1.3. Ces exigences réglementaires varient selon le référentiel considéré de ($U_g = 0.8$ avec FS = 0.35 et $\tau_l = 0.65$) et ($U_g = 0.8$ avec FS = 0.9 et $\tau_l = 0.91$).

En vue de réduire le facteur solaire d'un vitrage, deux techniques sont envisageables. La première consiste à déposer une couche mince et transparente de métaux nobles à l'intérieur de la vitre extérieure par pulvérisation cathodique pour réaliser un vitrage à contrôle solaire. Ce vitrage peut bloquer la chaleur jusqu'à 80% [53]. La seconde technique consiste à mettre en œuvre des protections solaires fixes ou mobiles en fonction du microclimat considéré.

Le cadre d'une fenêtre est un élément qui soutient le vitrage. Il représente généralement entre 10 et 30% de la surface de la fenêtre, raison pour laquelle il est considéré comme une source importante de perte de chaleur par transmission [54]. De même qu'une paroi opaque, elle se caractérise également par une forte absorption solaire. Cette partie de la fenêtre est en outre connue par les pertes de chaleur dues à l'infiltration d'air. Généralement, il existe cinq grandes

familles de matériaux pour les cadres à savoir, l'aluminium, le bois, le PVC, l'acier et le mixte bois-aluminium. La transmittance de ces matériaux varie généralement entre 1.7 et 5.7 W/m².K [55], [56].

1.4.1.3.3 Ponts thermiques

Les ponts thermiques représentent les parties de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique n'est pas homogène. En effet, la discontinuité de l'isolation des éléments de l'enveloppe (toiture, murs, planchers bas, etc.) entraîne une variation de la résistance thermique, ce qui crée impérativement des points faibles dans le bâtiment. À proximité des ponts thermiques, les lignes de flux de chaleur deviennent plus étroites, ce qui entraîne un échange de chaleur plus important par unité de surface. Ces ponts ne provoquent pas seulement des pertes de chaleur, mais peuvent également être une source de condensation (points froids) qui conduit à des taches de moisissure et de poussière en raison du phénomène de thermophorèse. Un pont thermique est donc créé dans le cas où :

- ✓ Il y a une modification de la géométrie de l'enveloppe ;
- ✓ Il y a un changement de matériaux et/ou de résistance thermique ;
- ✓ Il y a une discontinuité dans l'isolation à travers le mur ou la jonction mur-plancher.

Il faut savoir que les ponts thermiques représentent environ 10 à 20% des déperditions totales d'un bâtiment. Ainsi, il est très important de les limiter afin d'améliorer la performance énergétique des bâtiments.

La prévention et la détection des ponts thermiques dans les bâtiments sont l'un des points clés à prendre en considération dans les procédures d'économie d'énergie. Pour remédier aux ponts thermiques dès la conception, il est primordial de choisir des méthodes et des matériaux de construction qui réduisent au maximum les déperditions des parois et intègrent les déperditions les plus faibles possibles aux joints de ces parois. La thermographie infrarouge passive est utilisée depuis des années pour détecter les ponts thermiques en cas de rénovation, conformément aux dispositions de la norme ISO 6781:1983. Il existe trois types principaux de ponts thermiques, dont les plus importants sont ceux qui sont linéaires (la Figure 1.10 montre les ponts thermiques les plus courants) :

- ✓ **Ponts thermiques linéaires** : ils sont liés à la jonction de deux parois. Par exemple, la jonction entre le plancher et le mur extérieur et entre le mur extérieur et la cloison, à laquelle on attribue un coefficient de déperdition linéaire ψ (W/m.K) et une longueur L (m) ;

- ✓ **Ponts thermiques ponctuels** : ils sont liés à la jonction de trois parois. Par exemple, un angle entre un plancher et deux murs, auquel on attribue un coefficient de déperdition thermique χ (W/K) ;
- ✓ **Ponts thermiques structurels** : ils sont liés à la technique de mise en œuvre d'un isolant. En effet, une paroi est constituée de plusieurs éléments assemblés entre eux par collage, vissage ou assemblage mécanique, le développement de cet assemblage peut être à l'origine d'un pont thermique.

Un bon traitement des ponts thermiques réside dans la réalisation d'une isolation par l'extérieur, qui permet de réduire le coefficient ψ jusqu'à 0.01 W/m.K, comme le recommande le label Passivhaus. Les études montrent que ce traitement permet de réduire significativement les besoins en chauffage jusqu'à 12%. En revanche, avec une importance moindre en période estivale, ce traitement permet de réduire les besoins en climatisation de seulement 2% [57].

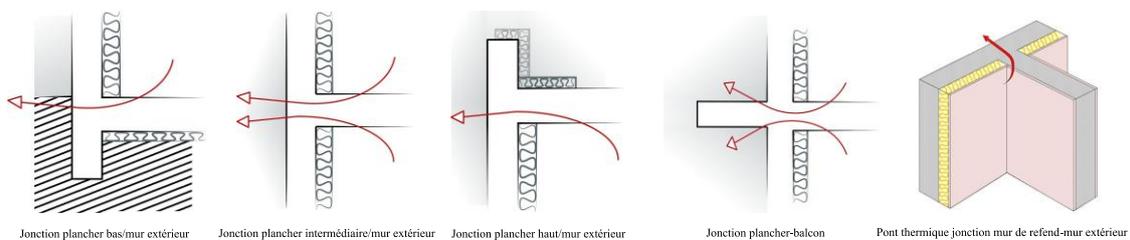


Figure 1.10. Variantes de ponts thermiques les plus courantes.

1.4.1.3.4 Protection solaire

La protection solaire est un terme générique utilisé pour couvrir toutes les mesures passives qui limitent la pénétration d'une énergie solaire excessive, allant des arbres d'ombrage et des auvents fixes aux stores et volets entièrement automatisés. La directive EPBD a encouragé les fabricants de stores et de volets à innover en matière de tissus et de matériaux présentant des propriétés de confort thermique améliorées pour le rejet et/ou la rétention de la chaleur, y compris une grande variété de propriétés de confort visuel. La gestion de la pénétration de la lumière naturelle tout au long de la journée pour optimiser le contrôle de l'éblouissement est tout aussi importante. Afin de couvrir les besoins des grandes surfaces vitrées, y compris sur les bâtiments de grande hauteur, les fabricants sont actuellement en mesure de fabriquer des systèmes de protection solaire très résistants aux charges de vent.

Les dispositifs de protection solaire présentent un potentiel considérable pour réduire les besoins en climatisation. Il est important de savoir que lorsqu'une surface de l'enveloppe est irradiée, soit un verre, une toile ou une lame, le rayonnement incident E est divisé en trois parties, de sorte que $\tau + \rho + \alpha = 100\%$ (voir Figure 1.11) :

- ✓ Une partie qui est transmise à travers le matériau. Elle est caractérisée par le facteur de transmission (τ), rapport du flux transmis sur le flux incident ;
- ✓ Une partie qui est réfléchiée par le matériau. Elle est caractérisée par le facteur de réflexion ρ , rapport du flux réfléchi sur le flux incident ;
- ✓ Une partie qui est absorbée par le matériau et qui est caractérisée par le facteur d'absorption α .

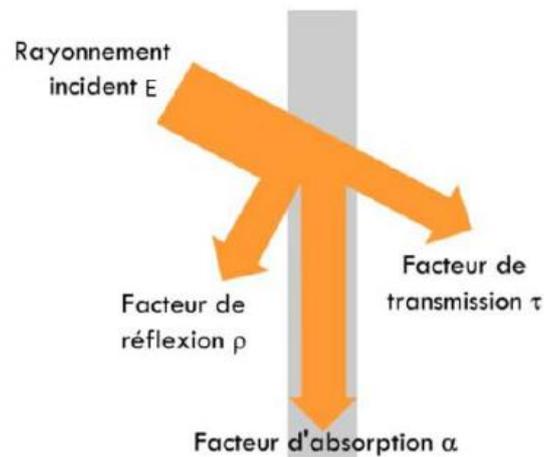


Figure 1.11. Comportement du rayonnement au contact d'un matériau [58].

Il existe trois principaux types de dispositifs de protection solaire. Ceux associés au vitrage des fenêtres (présentés dans la section 1.4.1.3.2), ceux fixés à l'enveloppe du bâtiment (casquettes solaires, brise-soleil, etc.) et ceux mobiles qui peuvent être fermés ou ouverts en fonction des utilisateurs ou de la gestion technique du bâtiment (stores, persiennes, etc.). Ces dispositifs permettent non seulement de réduire le facteur solaire, mais aussi de réduire la transmission lumineuse du vitrage.

Les dispositifs d'ombrage peuvent offrir des économies d'énergie entre 8 et 20% et des améliorations au niveau du confort thermique intérieur allant de 6 à 15% selon la zone climatique considérée, avec un dimensionnement optimal de ces dispositifs en tenant en compte les critères de confort thermique et visuel [59]–[61]. Dans le cas contraire, par exemple un surdimensionnement des casquettes solaires, l'effet inverse peut être reproduit avec l'augmentation excessive des besoins de chauffage et d'éclairage.

1.4.2 Volet actif

Le volet actif est défini, dans ce rapport de thèse, comme un ensemble de systèmes qui apportent au bâtiment des fonctionnalités utiles à son environnement, telles que le conditionnement d'air, l'éclairage, l'eau chaude sanitaire, etc. ainsi que la production locale de l'énergie requise.

1.4.2.1 Ventilation

La ventilation du bâtiment permet de maintenir la qualité de l'air intérieur et d'éviter sa dégradation. Cette opération se fait par l'évacuation de l'humidité et des polluants qui sont générés à la fois par l'activité humaine et par le bâtiment lui-même. Un débit d'air minimum doit être garanti pour une meilleure qualité de l'air intérieur du bâtiment, en se référant à la norme NF EN 15251.

Le renouvellement de l'air intérieur repose sur un principe général relativement simple qui mobilise des forces naturelles et/ou mécaniques. Un bon renouvellement de l'air intérieur provient du fait qu'une certaine quantité d'air est déplacée entre des entrées et des sorties d'air judicieusement placées dans le bâtiment. En principe, le renouvellement de l'air peut être assuré de manière naturelle, mécanique ou hybride, tel que présenté ci-dessous.

1.4.2.1.1 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle, très répandue dans l'habitat collectif et individuel avant 1975, a disparu des nouvelles constructions au début des années quatre-vingt avec l'avènement de la ventilation mécanique contrôlée (VMC). Ce type de ventilation est régi par des différences de pression, lorsque l'air se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression par des mécanismes d'écoulement. Ces différences de pression peuvent être causées par l'effet du tirage thermique, par le vent, ou par une combinaison des deux. Ces deux facteurs varient dans le temps et dépendent des caractéristiques du site [62].

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

$$P_v = \frac{1}{2} \rho C_p v_{vent}^2 \quad \text{Eq. (1.3)}$$

Où ρ est la masse volumique de l'air (kg/m^3), v_{vent} est la vitesse du vent (m/s) et C_p est le coefficient de pression du au vent (-). La valeur exacte de C_p est déterminée par la réalisation des expérimentations en soufflerie, sinon des valeurs standards sont définies dans la littérature dont une compilation a été faite par le Centre d'Infiltration d'Air et de Ventilation (AIVC) [63].

Le tirage thermique résulte de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Cela provoque une différence de densité de l'air qui entraîne un gradient de pression entre l'intérieur

et l'extérieur, suscitant ainsi la circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment. En principe, l'air circulant dans le bâtiment passe par le niveau bas et sort par le niveau haut, ce qui donne lieu à une zone neutre et par conséquent à une différence de pression nulle. Dans ce cas, l'équation caractéristique repose sur la loi de l'hydrostatique :

$$P_z = P_0 - \rho g z \quad \text{Eq. (1.4)}$$

$$\Delta P_{\text{int-ext}} = P_{0,\text{int}} - P_{0,\text{ext}} + (\rho_{\text{ext}} - \rho_{\text{int}}) g z \quad \text{Eq. (1.5)}$$

Où ΔP est la différence de pression totale entre l'intérieur et l'extérieur (Pa), $P_{0,\text{int}}$ est la pression de base à l'intérieur (Pa), $P_{0,\text{ext}}$ est la pression de base à l'extérieur (Pa), ρ_{ext} est la densité de l'air extérieur (kg/m^3), ρ_{int} est la densité de l'air intérieur (kg/m^3), g est la gravité (m/s^2) et z est la hauteur (m).

La formulation physique de la différence de pression totale ΔP , due à l'effet combiné du vent et du tirage thermique (voir Figure 1.12), s'écrit comme suit :

$$\Delta P_{\text{int-ext}} = P_{0,\text{int}} - P_{0,\text{ext}} + (\rho_{\text{ext}} - \rho_{\text{int}}) g z - P_v \quad \text{Eq. (1.6)}$$

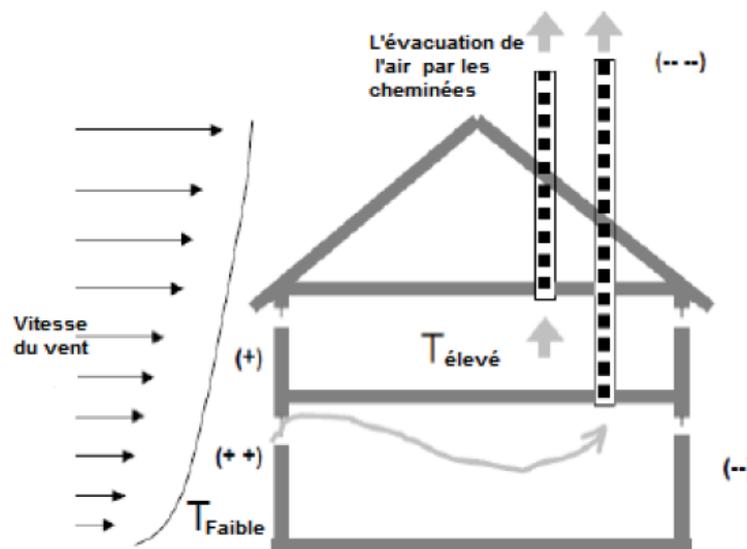


Figure 1.12. Effet combiné du vent et du tirage thermique [64].

1.4.2.1.2 Ventilation mécanique

La ventilation mécanique contrôlée permet d'aspirer l'air extérieur par des entrées d'air et de rejeter l'air intérieur. Cette opération s'effectue de manière régulière et réglable à l'aide d'un ou plusieurs ventilateurs, afin d'assurer un renouvellement d'air suffisant et contrôlé. La puissance consommée par ces ventilateurs et leurs auxiliaires varie en fonction du débit, du rendement, des pertes de charge et du temps de fonctionnement, comme le montre l'équation suivante :

$$Q_{ventil} = \frac{m_{tot} \Delta P_{ventil} t}{\eta_{tot} \times 3600} \quad \text{Eq. (1.7)}$$

Où Q_{ventil} est la puissance consommée par le ventilateur (W), ΔP_{ventil} est la perte de charge (Pa), m_{tot} est le débit d'air de la ventilation mécanique (m^3/h), η_{tot} est le rendement total du ventilateur et t est le temps de fonctionnement (h).

Ventilation mécanique simple flux :

La VMC simple flux est un dispositif permettant le renouvellement de l'air intérieur. Son fonctionnement est basé sur un extracteur électrique, soit un ventilateur inversé. Il est généralement situé dans les combles et aspire l'air vicié de l'intérieur (humide et pollué) pour faire entrer l'air neuf de l'extérieur. La mise en service de la VMC est simple, il suffit de placer des entrées d'air fixes ou auto-réglables dans les pièces de vie (séjour, chambres) pour que l'air circule à l'intérieur du bâtiment et qui sort par les bouches d'extraction situées dans les pièces humides (cuisine, salle de bain, WC), où l'air vicié est extrait vers l'extérieur à l'aide d'un ventilateur (voir Figure 1.13).

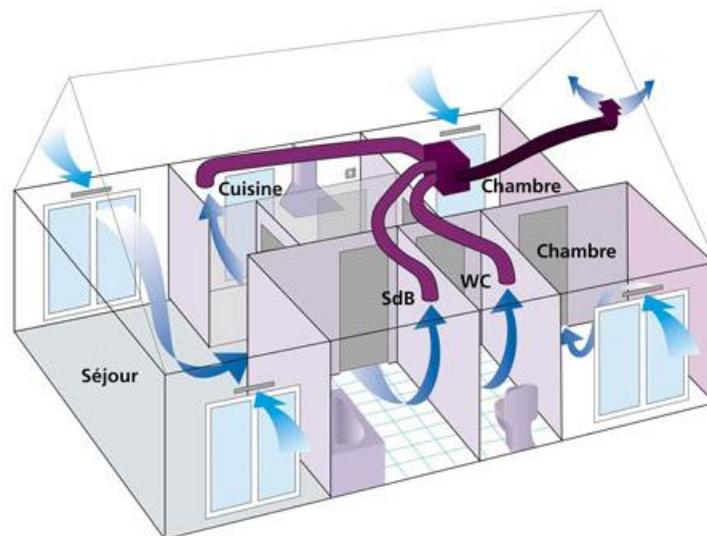


Figure 1.13. Prototype d'une maison équipée d'une ventilation mécanique simple flux [65].

Ventilation mécanique double flux :

La VMC double flux est un dispositif qui permet un meilleur contrôle des débits soufflés et extraits, qui peuvent être modulés de manière précise. Ce système permet de récupérer la chaleur de l'air extrait, ce qui limite la pénétration de l'air froid sur l'air neuf, et minimise les pertes thermiques par ventilation en Hiver. En Été, et parfois en mi-saison, un by-pass peut être utilisé pour empêcher la récupération de chaleur dans l'échangeur et ainsi bénéficier d'un air plus frais si la température est plus basse (voir Figure 1.14). L'efficacité de la récupération de

chaleur dans ce type de ventilation repose principalement sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur η_{vmc} (voir Figure 1.15), qui s'écrit comme suit :

$$\eta_{vmc} = \frac{T_s - T_{ext}}{T_r - T_{ext}} \quad \text{Eq. (1.8)}$$

Où T_s est la température de l'air soufflé ($^{\circ}\text{C}$), T_{ext} est la température extérieure ($^{\circ}\text{C}$) et T_r est la température de l'air de retour ($^{\circ}\text{C}$) (air évacué).

Cette efficacité varie entre 50% et 95% [66]–[68] et donc un taux de réduction des déperditions par renouvellement d'air de l'ordre de 50% à 95% par rapport à une ventilation simple flux.

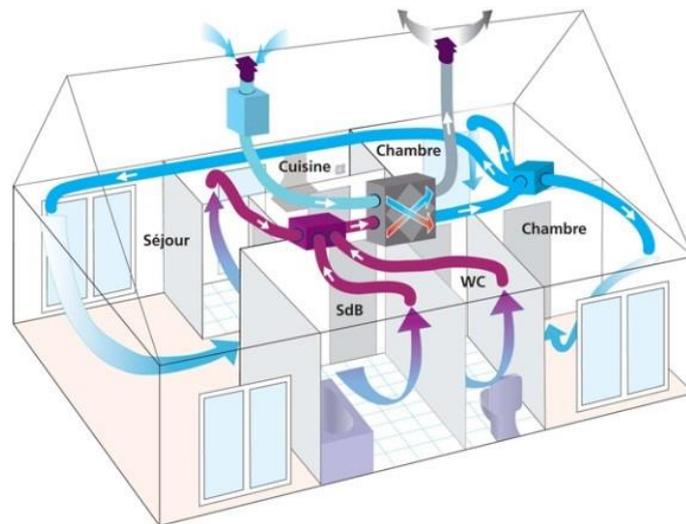


Figure 1.14. Prototype d'une maison équipée d'une ventilation mécanique double flux [65].

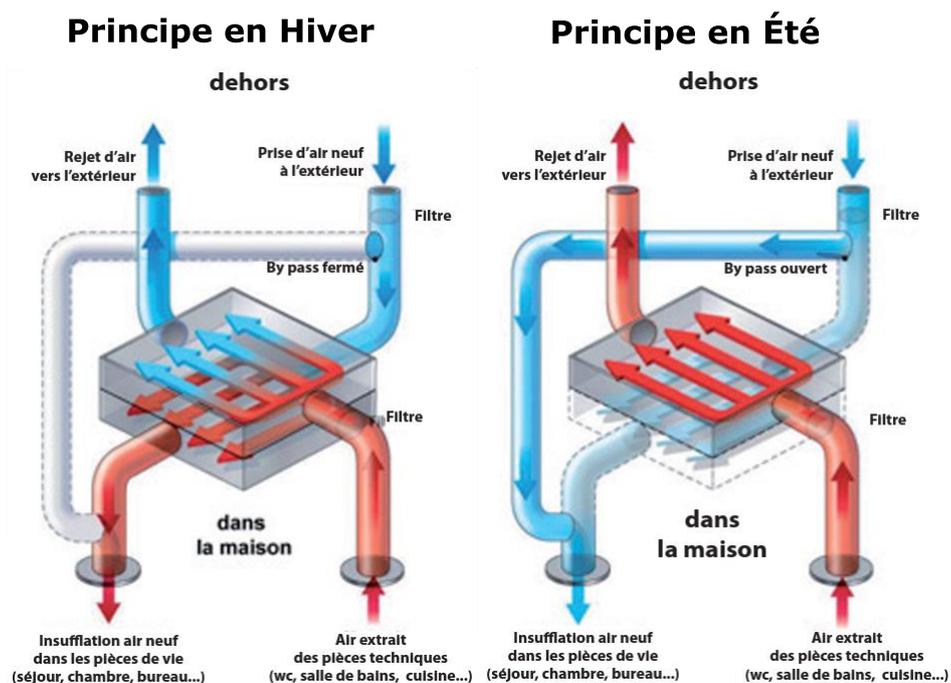


Figure 1.15. Schéma de principe de l'échangeur de chaleur pour les saisons d'hiver et d'été [69].

1.4.2.1.3 Ventilation hybride

La ventilation hybride est un nouveau concept de ventilation qui utilise et combine les meilleures caractéristiques des systèmes de ventilation naturelle et mécanique. Elle permet de réduire la consommation énergétique de la ventilation mécanique lorsque la ventilation naturelle est suffisante et ainsi d'assurer une bonne qualité de l'air intérieur [70]. Une des études menées dans cet axe de recherche a montré que ce système permet une économie d'énergie de 30 à 35% par rapport à une VMC [71].

En effet, ce type de ventilation présente une meilleure économie qu'une VMC, cependant il est plus compliqué à installer du point de vue technique (particularités techniques, encombrement, etc.), plus cher en termes d'investissement et ne prend pas en compte la déshumidification.

1.4.2.1.4 Puits climatique

Le principe de fonctionnement du puits climatique consiste à faire circuler l'air extérieur dans des tubes enterrés à une profondeur où la température du sol ne subit que de faibles variations en fonction de la saison. Lorsque l'air entre en contact avec le sol, il gagne ou perd de la chaleur et pénètre dans la maison par un système de ventilation. Le puits climatique est appelé « canadien » lorsqu'il permet de souffler de l'air chaud dans la maison ou « provençal » lorsque cet air permet de refroidir la température intérieure. Ces deux qualificatifs désignent un seul système, qui peut servir d'exemple pour la ventilation d'une maison individuelle, comme le montre la Figure 1.16.

Des études ont été réalisées en comparant la ventilation mécanique simple et double flux pour l'évaluation de la performance énergétique d'une maison individuelle type dans trois villes de France, en utilisant le principe du puits climatique. Il a été constaté que la ventilation double flux avec un échangeur de chaleur ayant un rendement de 75%, permet de réduire la consommation d'énergie finale de 22% pour le climat de Nancy, de 19% pour La Rochelle et de 16% pour Nice [72]. Cette réduction est particulièrement sensible pendant la saison estivale où un grand potentiel en matière de climatisation est observé.

Une étude menée pour le cas d'une maison individuelle à Marrakech en période estivale a montré que la température de sortie du puits climatique varie entre 20 et 28.8 °C alors que la température extérieure est comprise entre 30 et 44 °C [73]. Cela peut être très prometteur pour la climatisation passive des bâtiments, notamment dans les régions chaudes du Maroc.

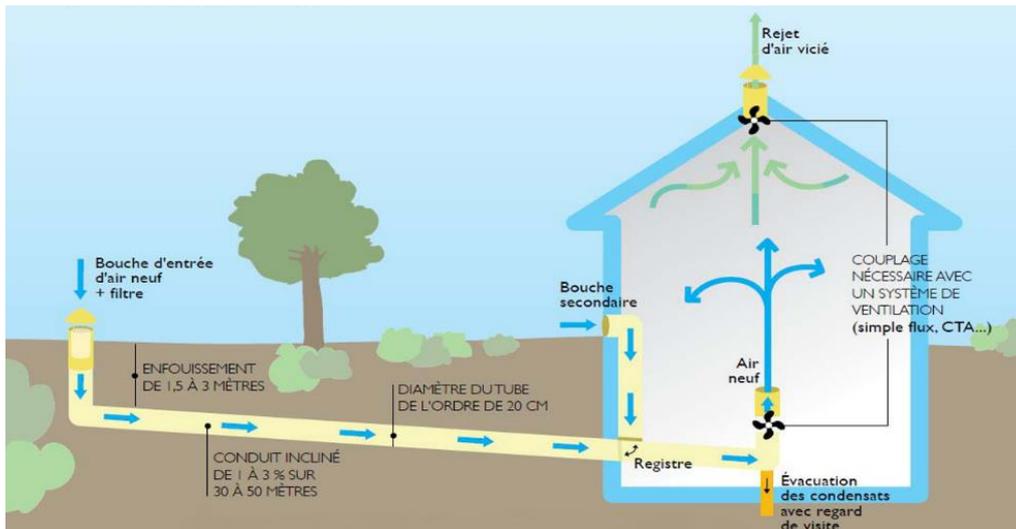


Figure 1.16. Principe de fonctionnement d'un puits climatique pour la ventilation d'une maison individuelle [74].

1.4.2.1.5 Free cooling

La ventilation intensive ou le « free cooling » repose sur le principe de la sur-ventilation, qu'elle soit mécanique ou naturelle, afin de refroidir un bâtiment avec l'énergie gratuite de l'air extérieur lorsque celui-ci possède une température inférieure à celle de l'intérieur. Une distinction peut être faite entre le free cooling diurne et nocturne en fonction du moment de la journée. Le free cooling nocturne fonctionne de manière efficace avec une forte inertie thermique de l'enveloppe. En revanche, parallèlement à la restitution de la chaleur par l'enveloppe, la sur-ventilation permet son évacuation. Cette technique est employée sans avoir recours à l'utilisation de systèmes de climatisation.

A titre d'exemple, pour l'estimation du potentiel de free cooling par ventilation naturelle [75] proposent d'utiliser la notion de la température de fonctionnement libre T_{fr} , en la comparant aux températures limites du confort définies par la norme NF EN ISO 7730. Ils montrent en effet que le free cooling n'est possible que dans le cas où la température T_{fr} est supérieure à la température extérieure T_0 qui est elle-même supérieure à la température limite supérieure de confort T_{cu} , comme le montre la Figure 1.17. Dans le cas contraire, le conditionnement d'air devient obligatoire. Les résultats ont ainsi montré que dans la région de l'Europe du Nord, le free cooling permettrait de couvrir plus de 50% des besoins en conditionnement d'air, soit une ampleur énorme à considérer. Il convient de noter que la température de fonctionnement libre, T_{fr} , est la température intérieure lorsqu'aucune énergie n'est fournie par le système de chauffage ou de climatisation et que le taux de renouvellement d'air est maintenu à sa valeur nominale, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de taux de renouvellement d'air supplémentaire pour le free cooling.

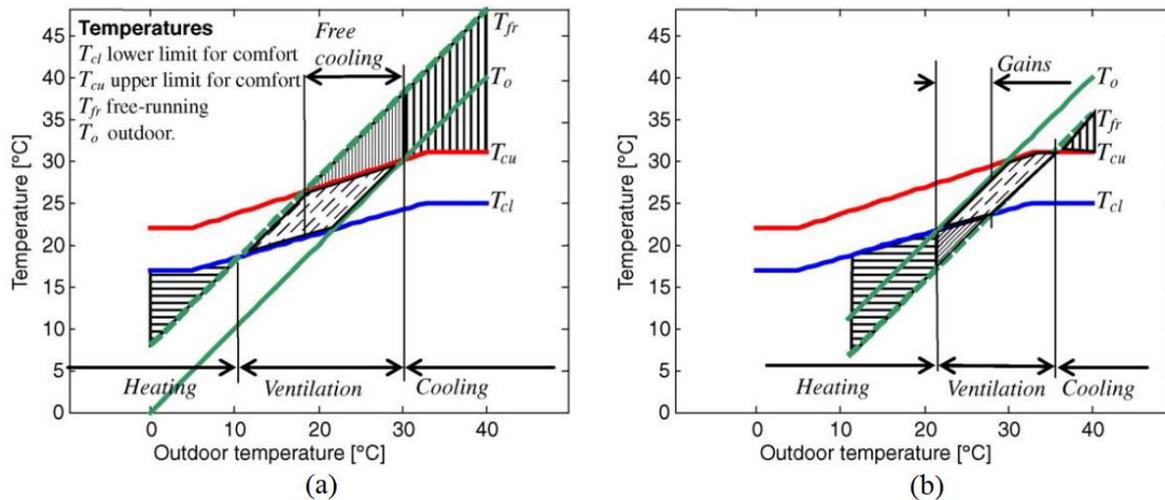


Figure 1.17. Variation du chauffage, du free-cooling et de la climatisation lorsque la température de fonctionnement libre est (a) supérieur (b) inférieure à la température extérieure [75].

1.4.2.2 Éclairage

L'éclairage est l'ensemble des moyens qui permettent à l'occupant de doter son environnement des conditions d'éclairage qu'il juge nécessaires à son activité ou à son plaisir. L'éclairage associe une source lumineuse et d'éventuels dispositifs de type piles, luminaires ou miroir/puits de lumière. L'amélioration des performances de l'éclairage est devenue l'un des axes prioritaires de la transition énergétique, dans la mesure où il présente le taux de retour sur investissement le plus rapide, estimé entre 3 et 5 ans dans les cas favorables [76].

Afin de réduire la consommation en énergie électrique due à l'éclairage artificiel, il est nécessaire d'une part de réaliser une bonne gestion technique en fonction de l'éclairage naturel. Cela peut se faire à travers des modes de gestion de l'éclairage artificiel (interrupteurs, détecteurs de présence, variateurs, etc.). D'autre part, il faudra choisir les lampes les plus performantes en luminosité mais aussi en consommation. L'Annexe 2 présente une comparaison entre différents types de lampes.

1.4.2.3 Production locale d'énergie

L'alimentation en énergie électrique du bâtiment est une nécessité cruciale, permettant à ses habitants de bénéficier d'une atmosphère vivante à l'intérieur, notamment en termes de conditionnement d'air, d'équipements électroménagers, d'éclairage, etc. La production locale d'énergie électrique est donc un facteur clé qui peut conduire à une indépendance ou à une autosuffisance énergétique quasi totale.

La production d'énergie dans les bâtiments est assurée par des systèmes qui utilisent principalement des ressources énergétiques fossiles et/ou renouvelables. En effet, dans

l'industrie, il existe de nombreux systèmes offrant une variété de solutions, dont certains ne produisent que l'énergie nécessaire au chauffage et/ou à la production d'eau chaude, comme les panneaux solaires thermiques, le bois-énergie, les chaudières, tandis que les pompes à chaleur se chargent du conditionnement de l'air (chauffage et climatisation). D'autres systèmes sont spécifiques à la production d'électricité à partir de capteurs solaires photovoltaïques, d'éoliennes voire même de la technique de transfert d'énergie par pompage. Il existe également des unités compactes qui chauffent ou refroidissent, et purifient l'air extérieur tout en assurant un flux de ventilation hygiénique. De nouvelles technologies sont en cours d'évaluation, comme la cogénération, qui consiste à produire simultanément de l'électricité et de la chaleur. Les paragraphes qui suivent présentent une description technique de ces différents systèmes, et plus particulièrement de ceux qui sont le plus fréquemment utilisés dans le bâtiment.

1.4.2.3.1 Chaudières

Le principe de fonctionnement des chaudières repose sur la transformation des combustibles fossiles en chaleur par un brûleur ou un foyer de combustion. Cette chaleur est transmise par un échangeur à un fluide caloporteur qui transmet à son tour la chaleur au réseau de distribution.

La performance énergétique d'une chaudière est exprimée par son rendement calorifique, défini comme le rapport entre l'énergie utile fournie par la chaudière et le pouvoir calorifique total du combustible consommé. Dans le cas d'une chaudière à eau chaude, le rendement instantané η_{chd} peut être exprimé comme suit [77]:

$$\eta_{\text{chd}} = \frac{m C_p (T_s - T_e)}{Q_{\text{fuel}} \text{PCI}} \quad \text{Eq. (1.9)}$$

Où m est le débit massique de l'eau chauffée (kg/h), C_p est la capacité thermique de l'eau chauffée (kJ/°C.kg), T_e est la température d'entrée de l'eau chauffée (°C), T_s est la température de sortie de l'eau chauffée (°C), Q_{fuel} est le débit massique du fuel (kg/h) et PCI est le pouvoir calorifique inférieur (kJ/kg). En cas de condensation de l'eau, le pouvoir calorifique inférieur passe au pouvoir calorifique supérieur (PCS), c'est-à-dire $\text{PCS} = \text{PCI} + \text{la chaleur de vaporisation de l'eau}$.

Le rendement global des chaudières varie généralement entre 46% dans le cas des anciennes chaudières surdimensionnées dotées d'une longue boucle de distribution et 82% dans le cas des chaudières à haut rendement dotées d'une boucle de distribution courte, de radiateurs isolés à l'arrière, d'une régulation par sonde extérieure, de vannes thermostatiques, etc.

1.4.2.3.2 Pompe à chaleur

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

Le principe de fonctionnement d'une PAC réside dans la compression d'un fluide frigorigène en état gazeux, qui se réchauffe et cède sa chaleur par condensation. Ce fluide à l'état liquide baisse en pression et en température lorsqu'il traverse le détendeur. Le fluide revient alors dans l'évaporateur où il recommence un nouveau cycle.

L'efficacité d'une pompe à chaleur est exprimée par le COP pour le mode chauffage et le EER pour le mode climatisation. Ces coefficients correspondent au rapport entre l'énergie utile et la quantité d'énergie délivrée. Au Maroc, il existe des intervalles de variation de ces coefficients définis, pour les bâtiments neufs, par la réglementation thermique, qui varient en fonction du type de pompe à chaleur, dont le COP varie entre 3 et 7 et l'EER entre 2.6 et 7 [38].

1.4.2.3.3 Systèmes solaires

L'énergie solaire, considérée comme une « énergie verte », est devenue populaire au cours des dernières décennies. Son utilisation a augmenté ces derniers temps, dans la mesure où de plus en plus de foyers, de bureaux et d'usines optent pour cette énergie dite « propre ». Cette énergie propre, renouvelable, gratuite et disponible, éventuellement dans le bassin méditerranéen, peut être utilisée de manière passive via l'enveloppe du bâtiment mais aussi via des systèmes qui relèvent de la fameuse rubrique appelée « le volet actif ».

Dans le bâtiment, l'énergie solaire est susceptible d'être le carburant d'un système permettant de produire de l'électricité, de l'eau chaude sanitaire et d'assurer le conditionnement d'air. Un panneau solaire thermique ou photovoltaïque est l'un des éléments clés pour exploiter l'énergie solaire. La prédiction de l'énergie produite par un panneau solaire n'est possible que lorsque certains paramètres sont renseignés, notamment l'orientation, l'inclinaison, le positionnement du masque solaire et le rendement du système.

Nous présentons ci-dessous un aperçu des principaux systèmes solaires qui ont été et peuvent être utilisés dans le secteur du bâtiment.

1.4.2.3.3.1 Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI)

Le CESI est un système relativement simple pour la production d'énergie par rayonnement solaire. Il se compose de capteurs solaires et d'un ballon de stockage. La circulation du fluide caloporteur chauffé par le capteur solaire transfère sa chaleur à l'eau d'un ballon de stockage via

un échangeur. Des composants supplémentaires peuvent être intégrés au système, comme le régulateur, la pompe de circulation et le système de chauffage d'appoint.

1.4.2.3.3.2 Systèmes Solaires Combinés (SSC)

Le SSC est un système permettant de produire non seulement de l'eau chaude sanitaire, selon le même principe qu'un CESI, mais également la production de chauffage pour le bâtiment. Outre ces systèmes, il existe particulièrement des systèmes appelés « Plancher Solaire Direct » (PSD), dont le principe de fonctionnement est relativement simple. Une fois le fluide caloporteur chauffé par les capteurs solaires, il est acheminé par des tuyaux situés dans une dalle de plancher. Dans ce cas, la dalle joue un rôle important avec son inertie thermique puisqu'elle permet de stocker et de restituer la chaleur dans la pièce. En cas d'ensoleillement insuffisant, les thermostats d'ambiance déclenchent le réseau d'appoint (utilisation d'une chaudière par exemple).

1.4.2.3.3.3 Climatisation solaire

La climatisation solaire, comme son nom l'indique désigne l'ensemble des moyens destinés à climatiser l'air ambiant des locaux, en utilisant comme ressource énergétique primaire l'énergie communiquée par les rayonnements du soleil. En théorie, il existe quatre types de systèmes de climatisation solaire :

- ✓ L'utilisation de l'énergie solaire thermique pour alimenter une machine frigorifique par le principe d'absorption ou d'adsorption ;
- ✓ L'utilisation de l'énergie solaire thermique pour alimenter un système de climatisation par évaporation ou par DEC (Dessicant Evaporative Cooling) ;
- ✓ L'utilisation de l'énergie mécanique provient de la conversion de l'énergie solaire thermique pour faire fonctionner le climatiseur à compression, doté d'un compresseur mécanique ;
- ✓ L'utilisation de panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité afin d'alimenter un système de climatisation traditionnel.

Actuellement, les systèmes de climatisation solaire les plus répandus sont les systèmes à absorption. Ce dispositif dissocie par ébullition une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants permet de produire, par absorption de chaleur, du froid qui est distribué dans un système de climatisation classique dans le bâtiment [78].

De manière générale, le rendement d'un panneau solaire thermique est défini comme le rapport entre la puissance utile récupérable sur un capteur solaire et la puissance incidente par le rayonnement solaire. Il s'écrit donc comme suit [79] :

$$\eta_c = \alpha\tau - K \frac{(T_m - T_{ext})}{E} \quad \text{Eq. (1.10)}$$

Où η_c est le rendement du capteur (-), α est le facteur d'absorption de l'absorbeur (-), τ est le facteur de transmission du vitrage (-), K est le coefficient de déperditions thermiques du capteur ($\text{W/m}^2\text{K}$), E est l'éclairement lumineux (W/m^2), T_m est la température moyenne du capteur (approximée par la moyenne entre les températures d'entrée et de sortie du capteur) (K) et T_{ext} est la température extérieure (K).

1.4.2.3.4 Photovoltaïque

Le principe des cellules photovoltaïques consiste à convertir la lumière du rayonnement solaire en énergie électrique grâce à l'utilisation de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium cristallin. Typiquement, un panneau de 0.5 m^2 composé de 36 cellules de 100 cm^2 produit 60 watts-crête à 15 V lorsqu'il est exposé à des conditions d'essai standard (STC) (c'est-à-dire une répartition du rayonnement de type solaire $AM = 1.5$, un rayonnement incident normal sur la cellule PV de 1000 W/m^2 , et une température de cellule de $+25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ [80].

Dans le secteur du bâtiment, l'électricité produite par le photovoltaïque est utilisée pour répondre aux besoins électriques des occupants. En cas d'excès d'énergie ou de surdimensionnement, cette énergie peut être renvoyée vers le réseau public, si cela est possible, sinon elle est perdue. Le rendement de ce type de capteur est défini comme le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance lumineuse qui lui est transmise. Il est exprimé par la formule suivante, qui varie généralement entre 8 et 30% [80]:

$$\eta_{ppv} = \frac{P_m}{E \times S} \quad \text{Eq. (1.11)}$$

Où η_{ppv} est le rendement du panneau photovoltaïque (-), P_m est la puissance de crête (Wc), définie comme la puissance électrique produite par la cellule (ou un panneau), lorsqu'elle est soumise aux conditions STC, E est l'éclairement lumineux (W/m^2) et S est la surface du panneau photovoltaïque (m^2).

Il existe actuellement différentes technologies photovoltaïques, à savoir :

- ✓ Le silicium polycristallin (pc-Si) ;
- ✓ Le silicium monocristallin (sc-Si) ;
- ✓ Le tellure de cadmium (CdTe) ;
- ✓ Le silicium amorphe (a-Si) ;
- ✓ Le CIS (cuivre, indium, sélénium), CIGS (cuivre, indium, gallium, sélénium), CIGSS (cuivre, indium, gallium, diséléniure, disulfure) et arséniure de gallium (Ga-As).

Dans le secteur du bâtiment, les deux types de panneaux solaires les plus courants sont les monocristallins et les polycristallins (voir Figure 1.18). Ces deux types de panneaux sont constitués de silicium (sous forme de cristaux). Les cellules des panneaux monocristallins sont composées d'un seul cristal, tandis que celles des panneaux polycristallins sont composées de plusieurs cristaux.

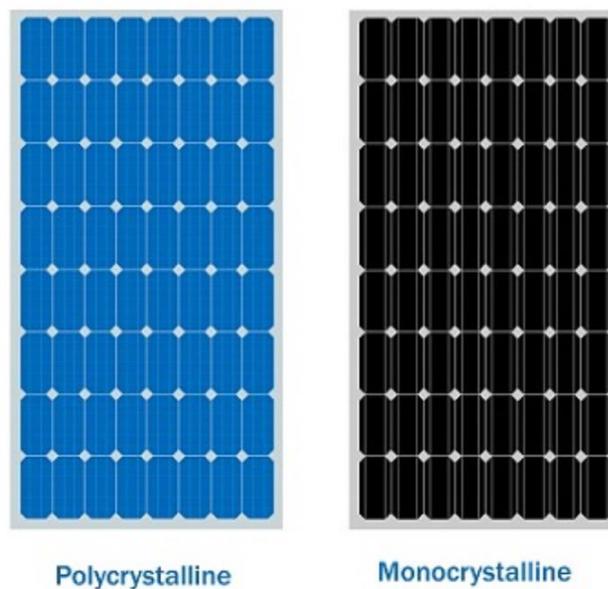


Figure 1.18. Panneaux photovoltaïques monocristallins et polycristallins.

1.4.2.3.3.5 Éolienne

Une éolienne est un système qui produit de l'énergie électrique par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie fournie par le vent fait tourner les pales, qui à leur tour font tourner le générateur de l'éolienne, qui n'est autre qu'un alternateur (courant alternatif). Le générateur transforme à son tour l'énergie mécanique du vent en énergie électrique (voir Figure 1.19). L'énergie électrique produite peut être consommée localement, stockée ou injectée dans le réseau électrique.

En milieu urbain, le vent est plus faible et plus turbulent que dans un espace ouvert (variations fréquentes de la vitesse et de la direction de l'air). Dans ce contexte, de petites éoliennes (éoliennes domestiques) peuvent être installées aux alentours ou intégrées au bâtiment. Elles peuvent produire de l'énergie électrique jusqu'à 20 kW, voire plus avec les développements technologiques futurs.

L'installation d'une éolienne nécessite une étude préalable de la vitesse du vent et des impacts qu'elle peut avoir sur son environnement. Pour faire fonctionner une éolienne, la vitesse minimale ne doit pas être inférieure à 3 m/s, et cette vitesse ne doit pas dépasser 20 m/s pour ne pas endommager le système. La vitesse nominale à laquelle l'éolienne est capable de produire sa puissance nominale est généralement d'environ 15 m/s.

Le rendement moyen global de l'éolienne est défini comme le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie du vent disponible. En général, le rendement moyen des petites éoliennes est d'environ 20%.

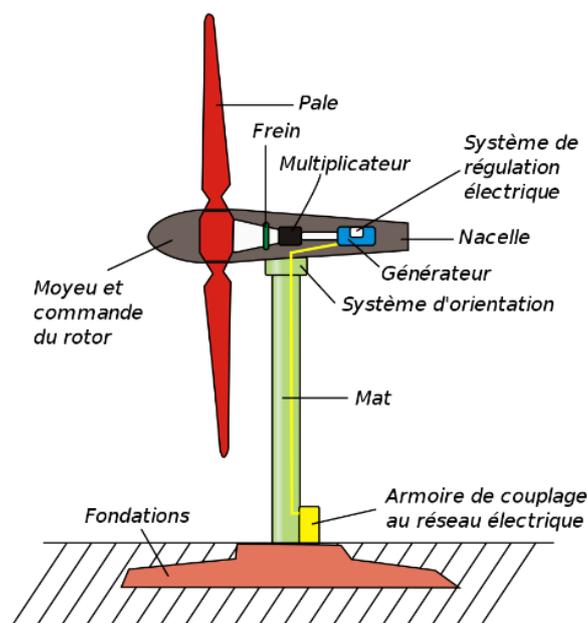


Figure 1.19. Schéma de principe d'une éolienne.

1.4.2.3.4 Transfert d'énergie par pompage

Le transfert d'énergie par pompage consiste à pomper l'eau d'un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur lorsqu'il y a un excédent d'énergie disponible. L'eau est libérée du réservoir supérieur vers le réservoir inférieur par la turbine pour produire de l'électricité lorsqu'il y a un besoin éventuel. Cette technique n'est rarement, voire pas du tout, utilisée dans le secteur du bâtiment. Pourtant, elle présente un énorme potentiel énergétique.

En effet, les ressources énergétiques renouvelables présentent une sorte de vulnérabilité en termes de production d'électricité, qui n'est pas permanente. Ceci est tout à fait naturel, puisqu'elles dépendent de manière proportionnelle des conditions climatiques. Pour cette raison, le pompage-turbinage peut être considéré comme un avantage potentiel en termes de sécurité énergétique, permettant de pallier, en partie ou en totalité, les limites des ressources énergétiques renouvelables. En d'autres termes, il peut remplir la fonction d'un banc de stockage d'énergie, c'est-à-dire pomper l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur lorsqu'il y a un excès d'énergie, puis en tirer parti lorsqu'il y a un besoin éventuel.

La performance d'une installation de transfert d'énergie par pompage est évaluée par la combinaison de deux paramètres de référence, à savoir le débit de sortie du réservoir supérieur (Q_{ps}) et la hauteur manométrique (H_{ps}) du circuit hydraulique qui relie le réservoir inférieur au réservoir supérieur.

1.4.2.3.5 Batterie de stockage d'énergie

Le stockage d'énergie est un processus qui consiste à stocker une quantité d'énergie provenant d'une source pour une utilisation ultérieure. Les dispositifs de stockage d'énergie tels que les batteries constituent une nécessité pour exploiter efficacement les ressources énergétiques renouvelables lorsqu'elles sont intermittentes, telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Dans le secteur du bâtiment, par exemple, le stockage de l'électricité permet de stabiliser les réseaux énergétiques, de régulariser les fluctuations de production/consommation et de renforcer la sécurité énergétique.

La performance du parc de stockage d'énergie est évaluée à l'aide d'un modèle qui utilise l'équation d'équilibre instantané de l'état de charge (SOC). Ce modèle est détaillé mathématiquement dans le chapitre 3.

En général, le rendement des batteries de stockage d'énergie varie dans une fourchette de 65 à 75% en fonction de plusieurs paramètres et variables qui peuvent légèrement fluctuer dans la réalité, tels que la température, la qualité des batteries, l'efficacité des onduleurs, les transformateurs, etc.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents aspects de l'énergétique du bâtiment sur le plan international et en particulier au Maroc. Ces aspects comprennent le contexte, les enjeux, le cadre réglementaire et le paramétrage des volets énergétiques du bâtiment.

Nous avons constaté que la situation est très critique dans le secteur du bâtiment (voir Figure 1.20). La transition énergétique est déjà amorcée et continue à se concrétiser par la mise en place de politiques incitatives basées sur les investissements, les engagements normatifs et réglementaires, la réalisation et le contrôle.

Au Maroc, une étape importante a été franchie en ce qui concerne l'enveloppe énergétique du bâtiment et l'intégration des énergies renouvelables. En revanche, certaines lacunes techniques doivent encore être comblées dans les prochaines versions des standards. La réhabilitation énergétique des bâtiments existants représente une voie importante à privilégier, sauf qu'elle n'est pas considérée comme une priorité dans le référentiel thermique de la construction au Maroc, par rapport à la conception de nouveaux bâtiments.

Afin de remédier à ces problèmes, des projets de lois et de règlements ont été mis en place par plusieurs pays dans le monde, ayant pour objectif d'encadrer l'accompagnement énergétique dans le secteur du bâtiment, notamment le règlement thermique de construction au Maroc. Afin de ne pas limiter notre réflexion aux cadres réglementaires et de promouvoir la construction de bâtiments à très basse consommation, voire à énergie positive, nous avons présenté les différents labels et certifications qui proposent la mise en œuvre de solutions techniques performantes.

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

Enfin, nous pouvons affirmer que pour obtenir un bâtiment aussi performant que possible, confortable, autosuffisant en énergie et qui respecte l'environnement, il est nécessaire de mettre en place plusieurs approches de calcul, de simulation et d'optimisation. Ces approches peuvent être classées en deux familles, l'une pour l'optimisation du volet passif et l'autre pour le volet actif du bâtiment. Pour cette raison, un état de la technique sur l'ensemble des techniques utilisées dans cet axe de recherche, notamment sur ces deux démarches, doit être réalisé. La présentation de cet état de la technique fait l'objet du chapitre suivant.

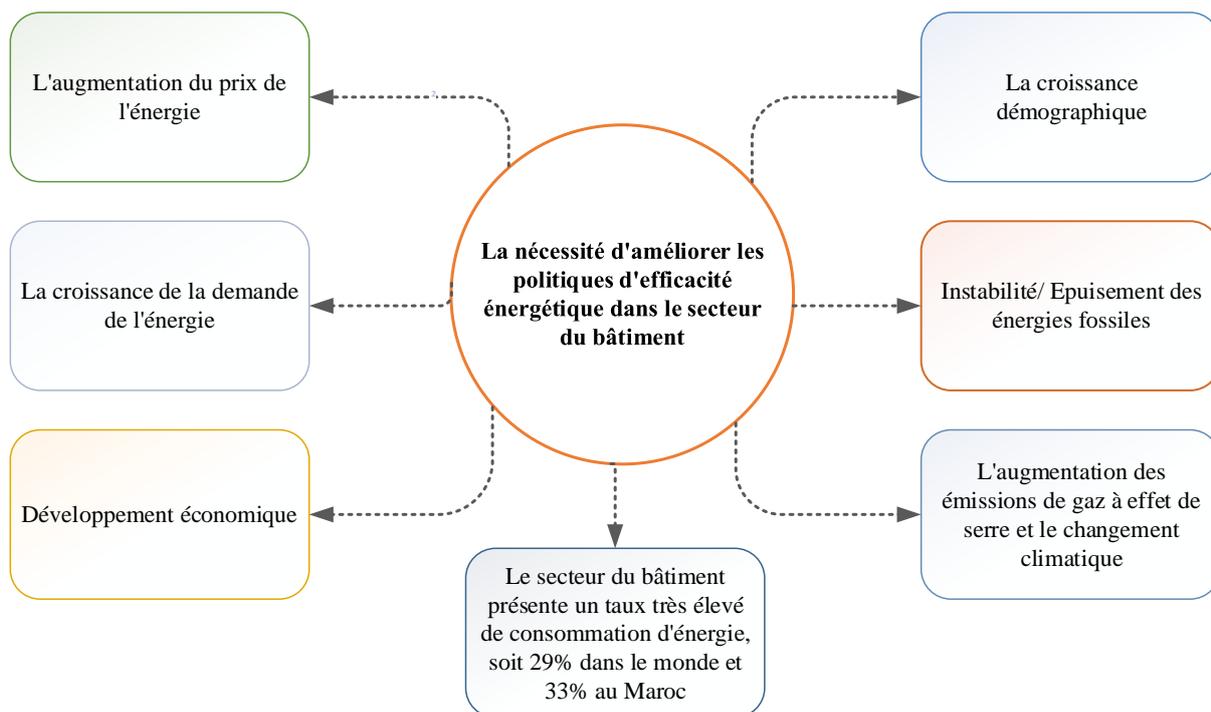


Figure 1.20. Les différents enjeux dans le secteur du bâtiment.

Chapitre. 2 : Aide à la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique : Etat de la technique

2.1 Introduction

Le chapitre précédent a fait le point sur les aspects techniques, économiques, environnementaux et sociaux de l'énergie du bâtiment. Il a été constaté que l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments constitue un véritable pilier qu'il convient d'aborder de toute urgence afin de relever l'ensemble des défis précités.

Les bâtiments confortables et à consommation énergétique quasi nulle suscitent l'intérêt du monde entier en raison de leur capacité à offrir un environnement intérieur confortable, à réduire la consommation d'énergie et à atténuer les pénuries d'énergie causées par un développement économique rapide. Pour concevoir ce type de bâtiment, il est impératif d'envisager la réponse à une question fondamentale, à savoir : Quelle est la configuration optimale de l'enveloppe du bâtiment qui permet d'obtenir les meilleures mesures de performance souhaitées ?

En effet, la réponse à la question ci-dessus nécessite beaucoup de temps pour obtenir une solution, dans la mesure où ce type de problème présente un niveau de complexité très élevé. En revanche, les chercheurs ont, et continuent de proposer des approches de résolution de ce type de problème, permettant d'obtenir les solutions souhaitées en un minimum de temps. Ces solutions s'inscrivent dans le cadre du développement d'un outil d'aide à la conception de bâtiments à Haute Efficacité Énergétique (HEE). Dans ce chapitre, nous allons voir l'état de la technique de ces outils, en présentant leur performance, leur fiabilité, leur précision et les éventuelles lacunes qu'ils présentent.

2.2 Etat de la technique

Par définition, l'état de la technique désigne l'ensemble des connaissances techniques et pratiques dans un domaine spécifique, connues du public grâce à leur publication et leur diffusion dans les différentes plateformes scientifiques existantes. Dans ce rapport de thèse, un état de la technique exhaustif sur les outils courants (méthodes, approches, frameworks,...) d'aide à la conception de bâtiments HEE est présenté. Ces outils comprennent généralement 3

phases principales, à savoir : la formulation du problème considéré, la pré-optimisation de ce problème et enfin la phase d'optimisation.

2.2.1 Formulation

La formulation du problème d'optimisation est une étape clé pour le développement d'un outil d'aide à la décision, car elle permet de confronter les modèles établis à un cahier des charges spécifique. Un problème d'optimisation bien posé est un problème d'optimisation qui admet au moins une solution réalisable. En revanche, la résolution d'un problème mal posé consiste à rechercher des solutions optimales alors qu'il n'existe aucune solution réalisable.

Un problème d'optimisation multi-objectif et à plusieurs variables est un problème de décision multicritères qui se caractérise par la prise en compte explicite de plusieurs objectifs à optimiser simultanément dans l'analyse des préférences, la comparaison des solutions et la détermination d'une ou plusieurs solutions optimales. La formulation d'un tel problème est définie par l'espace de recherche, l'espace des objectifs et la relation entre les deux.

L'espace de recherche représente l'ensemble des solutions possibles qui sont définies à partir des intervalles de variation des paramètres intrinsèques du problème. Le nombre et la nature des variables (continues et/ou discrètes) déterminent la dimension et la nature de cet espace.

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

La Figure 2.1 représente l'espace de recherche et l'espace des objectifs pour un exemple de problème à deux objectifs, dont les solutions sont caractérisées par trois variables. Une solution x du problème est donc définie à partir des valeurs prises par les trois variables x_1 , x_2 et x_3 . Cette solution est évaluée à partir des critères de décision f_1 et f_2 , déterminant ainsi un point unique z dans l'espace des objectifs.

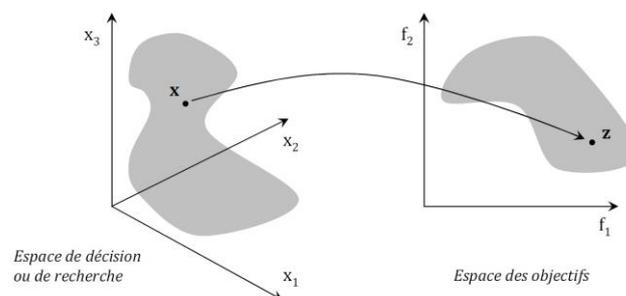


Figure 2.1. Exemple de représentation de l'espace de recherche et de l'espace objectif qui correspondent à un problème à trois variables et deux fonctions objectif.

Dans le domaine de l'énergétique du bâtiment, l'espace de recherche est déterminé par les variables de conception qui peuvent être des paramètres liés à l'enveloppe et/ou aux systèmes de conditionnement d'air ou de production d'énergie. Alors que l'espace des objectifs doit être défini par les décideurs en fonction des critères décisionnels. Dans le secteur du bâtiment, les variables de conception et les critères de décision sont multiples, qui peuvent être regroupés de manière non exhaustive, comme le présente la Figure 2.2.

Comme mentionné précédemment, les outils d'aide à la conception de bâtiments HEE consistent à optimiser les performances souhaitées en fonction des variables de conception en vigueur. Le lien entre les deux espaces nécessite des méthodes et des outils pour prédire le comportement énergétique du bâtiment ainsi que des processus d'optimisation numérique.

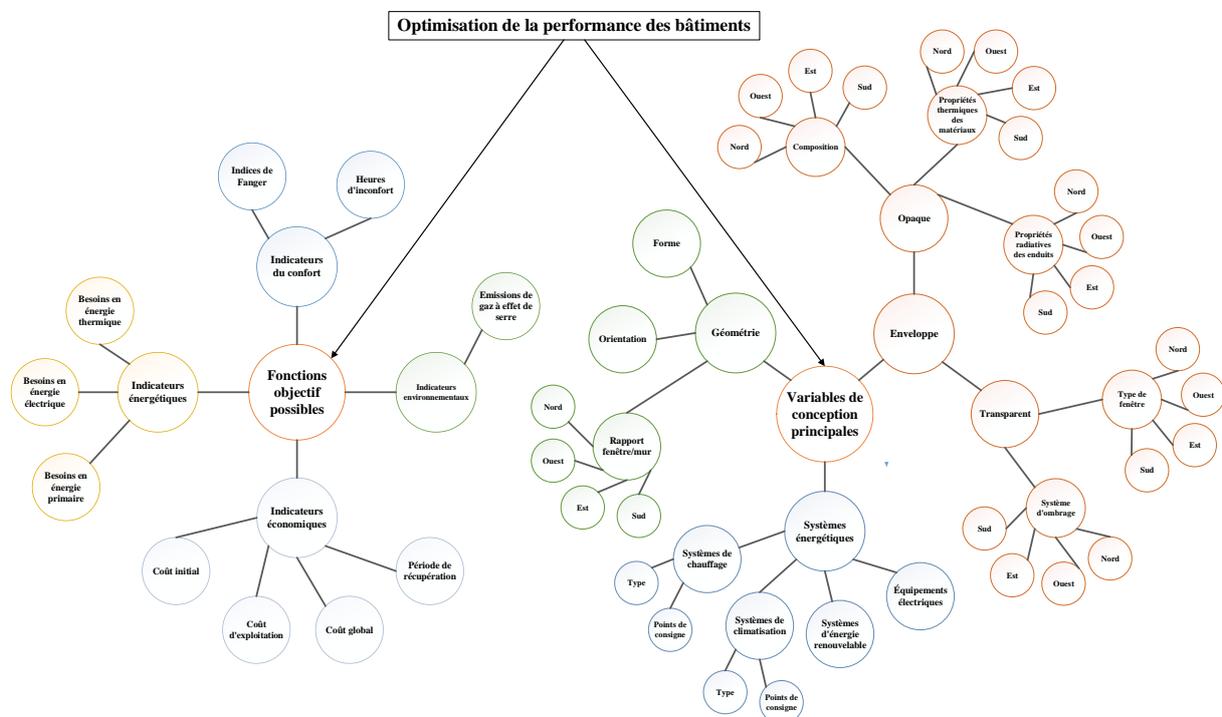


Figure 2.2. Les fonctions objectif possibles et les principales variables de conception pour un problème d'optimisation de la performance des bâtiments.

2.2.1.1 Variables de conception

Les variables de conception sont les variables parmi lesquelles le propriétaire peut choisir pendant la conception de son bâtiment. Ces variables peuvent être liées à l'enveloppe du bâtiment, ainsi qu'aux systèmes qui lui seront employés pour garantir un fonctionnement idéal. Parmi ces variables figurent la forme, l'orientation, les parois opaques et vitrées, les systèmes de conditionnement d'air, etc. Les architectes modélisent depuis longtemps leurs projets à l'aide de paramètres liés à la conception, dans le but de répondre aux exigences des parties prenantes

et aux contraintes externes liées à des enjeux particuliers tels que les exigences légales, les facteurs environnementaux, le processus de construction, etc.

La construction de bâtiments confortables et à faible consommation d'énergie se fait par la réalisation d'une conception appropriée de ses volets passif et actif. Le choix des paramètres d'étude pour l'optimisation des bâtiments est un sujet de débat scientifique, étant l'objet d'un problème très complexe. En effet, comme indiqué précédemment, ces variables présentent de multiples facettes, et peuvent impacter les performances du bâtiment de manière linéaire ou non linéaire en fonction de plusieurs critères, en particulier, le type de bâtiment, la zone climatique et les indicateurs de performance ciblés. Actuellement, l'incertitude et la sensibilité de ces variables ont fait l'objet de plusieurs études, visant à illustrer le comportement de chacune de ces variables sur les indicateurs de performance des bâtiments [81]–[85].

Parmi les différentes variables de conception qui existent, certaines ont été utilisées plus que d'autres, en raison de leur impact significatif sur les indicateurs de performance des bâtiments. Les tableaux figurant à l'Annexe 3-A et à l'Annexe 3-B présentent une revue de la littérature sur les études qui ont abordé le même champ d'investigation, en mettant l'accent sur les variables de conception les plus couramment utilisées et ayant un impact significatif sur les performances des bâtiments. Ces variables de conception comprennent les paramètres thermo-physiques liés aux parois opaques et vitrées et aux systèmes de conditionnement d'air, à savoir les murs extérieurs, le toit, le plancher, les fenêtres et leurs cadres, les ponts thermiques, les dispositifs d'ombrage, la ventilation et les infiltrations.

La nature de ces paramètres peut être continue (V_C) ou discrète (V_D). L'utilisation de paramètres discrets rend le problème non convexe et discontinu et conduit donc à une plus grande difficulté en termes de solution mathématique [86]. Le temps de calcul et le stockage des données augmentent de manière exponentielle lorsque le nombre de paramètres discrets augmente. Il est donc généralement recommandé d'éviter l'utilisation de variables discrètes dans un processus d'optimisation [87].

2.2.1.1.1 Forme

La conception d'un bâtiment à haute efficacité énergétique ne signifie pas que l'on puisse négliger des considérations importantes telles que la forme du bâtiment et l'esthétique, qui dépend largement de la forme. En fait, la forme du bâtiment peut affecter de manière significative la performance énergétique. Tuhus-Dubrow et Krarti [88] ont utilisé un outil de simulation et d'optimisation pour optimiser la forme du bâtiment dans le cadre de l'optimisation

de l'enveloppe du bâtiment. Les formes alternatives du bâtiment comprenaient un rectangle, un L, un T, une croix, un U, un H et un trapèze. Jin et Jeong [89] ont proposé une méthodologie d'optimisation pour générer une forme de bâtiment de forme libre avec une charge thermique externe minimale. Rhinoceros 3D a été utilisé pour modéliser les bâtiments générés de forme libre. HORIKOSHI et al. [90] ont développé un modèle de calcul de l'énergie des bâtiments couplé à un programme d'optimisation des formes utilisant un algorithme génétique (GA). Dans cette étude de cas, la forme et la répartition des zones d'un bâtiment ont été optimisées afin de minimiser la consommation d'énergie liée à l'éclairage et à la climatisation. Dans le but de dépasser l'optimisation de la forme précédente qui est limitée à une forme de bâtiment simple, Yi et Malkawi [91] ont développé une nouvelle méthode d'optimisation pour générer un arrangement de bâtiment complexe. Cette méthode introduit des relations hiérarchiques entre les points de géométrie pour générer des arrangements complexes de bâtiments. Rakha et Nassar [92] ont proposé une méthode de conception et d'optimisation par algorithme génétique pour aider les architectes à générer et à trouver les formes optimales de plafonds curvilignes et maillés. Loonen et al. [93] ont exploré la méthode de conception d'enveloppes de bâtiment adaptées au climat en utilisant une simulation des performances du bâtiment en combinaison avec une optimisation multi-objectif et des stratégies de contrôle avancées. Les résultats ont montré que les performances des enveloppes de bâtiment conçues de manière optimale étaient bien supérieures à celles de la meilleure enveloppe de bâtiment conçue de manière statique. Shi et Yang [94] ont discuté de la sélection d'une forme de base adaptée aux architectes, sur laquelle l'outil de conception architecturale axée sur la performance peut être développé. Ils ont également démontré un cadre technique en utilisant Rhinoceros 3D en tant qu'outil de modélisation architecturale et Grasshopper 3D en tant que créateur d'algorithmes, tout en incorporant trois programmes de simulation des performances : Ecotect, Radiance et EnergyPlus. Turrin et al. [95] ont discuté de l'avantage de combiner la modélisation paramétrique et les GA pour obtenir un processus de conception orienté vers la performance. Ils ont également développé un outil de conception correspondant qui comporte quatre étapes de base : (1) sélection des variables, (2) génération de formes, (3) évaluation des formes générées, et (4) stockage et analyse des solutions. Marsault [96] a fait la démonstration d'un programme d'un algorithme génétique multi-objectif et interactif pour optimiser la forme du bâtiment dans les premières étapes de la conception, dans le but de combler le fossé entre la conception architecturale et l'analyse énergétique. Le programme proposé, EcCoGen, associe un moteur morphogénétique, qui offre un algorithme génétique interactif, une interface utilisateur graphique et Rhinoceros 3D avec son plug-in Grasshopper 3D. Yi et al. [97] ont

proposé une approche intégrée énergie-énergie pour l'optimisation de la forme des bâtiments, qui se compose de trois modules : le module de simulation énergétique des bâtiments, le module d'analyse énergétique des bâtiments et le module de développement de méta-modèles. Les résultats de l'optimisation de la forme du bâtiment ont été validés par un test analytique. Une étude de cas a indiqué que la méthode proposée facilite l'utilisation pratique de la simulation de l'énergie dans le processus de conception environnementale. Wang et al. [98] ont présenté une méthodologie basée sur le GA pour optimiser la forme du plancher du bâtiment qui est basée sur une empreinte de bâtiment polygonale à plusieurs côtés. Ouarghi et al. [99] ont proposé une approche intégrée impliquant un réseau de neurones (NN) et un GA pour optimiser la sélection de la forme d'un immeuble de bureaux. Les résultats de l'optimisation ont montré que l'approche hybride NN-GA offre une méthode robuste et efficace pour sélectionner la forme d'un immeuble de bureaux. Rodrigues et al. [100] ont proposé une approche pour générer automatiquement un plan d'étage de bâtiment en utilisant une approche évolutionnaire hybride. Une fois généré, un algorithme d'optimisation est utilisé pour améliorer la performance thermique de chaque solution. Kämpf et al. [101] ont conçu un algorithme hybride CMA-ES/HDE afin d'optimiser les formes géométriques des bâtiments et des villes pour déterminer l'utilisation optimale du rayonnement solaire, qui est prédit par RADIANCE en conjonction avec un modèle de ciel cumulatif pour un calcul rapide. Yi et Kim [102] ont proposé une méthode d'optimisation qui utilise un système de contrôle géométrique basé sur un agent qui définit des paramètres pour contrôler un bâtiment de manière hiérarchique. La méthode proposée permet de repositionner la disposition et la géométrie du bâtiment, avec comme critère l'ensoleillement direct.

2.2.1.1.2 Parois opaques

Les parois opaques sont de différents types, comme les parois multicouches communes, les parois Trombe, les parois de ventilation, les toits verts, les toits photovoltaïques, les parois à changement de phase, etc. [42]. Plusieurs études se concentrent sur l'investigation de l'isolation des murs. Pour les bâtiments à dominante chauffage, Bojic et al. [103] ont optimisé l'épaisseur de l'isolation d'une petite maison résidentielle en utilisant EnergyPlus et la méthode de recherche directe de Hooke-Jeeves. Pour les bâtiments à dominante de climatisation, Shi [104] a optimisé l'épaisseur de l'isolation des murs extérieurs selon quatre orientations afin de minimiser les besoins en climatisation d'un immeuble de bureaux. Il s'agit d'un exemple typique d'utilisation de la charge de climatisation comme critère de conception, qui peut aider les ingénieurs mécaniciens à concevoir de petits systèmes CVC. Hamdy et al. [105] ont appliqué

une approche modifiée d'optimisation multi-objectif à trois cas ayant différents niveaux de surchauffe estivale, permettant de trouver un ensemble de combinaisons optimales. Les résultats indiquent que pour éviter la surchauffe estivale, les habitations ayant des mesures de ventilation naturelle insuffisantes pourraient avoir besoin d'une isolation moindre que celle requise par la norme. Pour minimiser les émissions de CO₂ et les coûts du cycle de vie, Fesanghary et al. [106] ont utilisé des matériaux de construction et un type de vitrage prédéfinis comme paramètres de conception, et ont ainsi exploré un large éventail d'options de conception, autres que la valeur U de l'enveloppe opaque. Lin et al. [107] ont réalisé une conception et une optimisation des configurations de l'enveloppe d'un immeuble de bureaux pour la conservation de l'énergie à l'aide d'un modèle prédictif des performances du bâtiment peu commun. L'optimisation a permis de réduire les coûts de 41% par rapport à la conception initiale. Kuznik et al. [108] ont proposé une méthode d'optimisation des murs pour le chauffage, basée sur un méta-modèle de matériaux à changement de phase, qui peut être utilisée pour définir les propriétés optimales des matériaux et tester les différentes solutions matérielles possibles. Schwartz et al. [109] ont utilisé MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) pour trouver des conceptions optimales pour une étude de cas de rénovation d'un complexe résidentiel, en termes de LCCF (Life Cycle Carbon Footprint) et de LCC (Life Cycle Cost). Ce travail porte sur l'analyse des impacts sur le cycle de vie de l'isolation des ponts thermiques. En raison de sa facilité de mise en œuvre, l'optimisation de la construction de parois opaques est une pratique courante dans la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique.

2.2.1.1.3 Parois vitrées

Les parois vitrées jouent un rôle crucial en matière d'éclairage naturel, de ventilation naturelle et de gain ou de perte de chaleur. Lartigue et al. [110] ont défini les rapports fenêtres/murs (WWR) et 13 types de fenêtres comme variables, utilisant TRNSYS comme moteur énergétique et Daysim comme moteur de simulation de la lumière du jour. Les résultats de l'optimisation ont indiqué que leur méthodologie, facile à mettre en place, était capable de trouver les solutions optimales pour de multiples problèmes d'objectifs antagonistes. Gagne et Andersen [111], [112] ont présenté une méthode de conception générative de façades basée sur le GA pour un objectif de performance élevée de l'éclairage naturel. Une étude de cas a montré la réussite du processus d'exploration de la conception axée sur les objectifs. Lee et al. [113] ont optimisé un système de fenêtres de bâtiment pour une faible consommation d'énergie de chauffage, de climatisation et d'éclairage dans cinq climats asiatiques typiques. Au moyen d'une analyse de régression, des graphiques et des tableaux détaillés sur la relation entre les propriétés des fenêtres et la

performance énergétique du bâtiment sont présentés en fonction de la valeur U, du SHGC, du Tvis, du WWR, de l'ouverture solaire, de l'ouverture effective et de l'orientation. Ferrara [114] a réalisé une étude de cas d'optimisation de la conception d'une maison à faible consommation en utilisant un outil intégré de TRNSYS et GenOpt. Différents systèmes d'enveloppe avec différents types de fenêtres ont été définis comme variables d'optimisation, et un algorithme d'optimisation par essaims de particules (PSO) a été utilisé pour trouver la configuration optimale du bâtiment en termes de coûts. Wright et Jonathan [115] ont proposé une méthode d'optimisation multi-objectif pour le fenêtrage, qui divise la façade en un certain nombre de petites cellules régulièrement espacées. Grâce à cette méthode, des formes architecturales innovantes ont été trouvées.

Les puits de lumière sont populaires dans les complexes commerciaux et les grands immeubles de bureaux en raison de leurs excellentes performances en matière d'éclairage naturel. Ghobad et al. [116] ont mené une optimisation de la conception des ouvertures de toit à l'horizon des immeubles de bureaux. Leurs résultats ont montré une suggestion de zone d'ouverture optimale, des économies d'énergie et un coût opérationnel. Acosta et al. [117] ont optimisé la forme des lanterneaux de type « Lightscoop », dont l'ouverture verticale est orientée de façon opposée à la trajectoire du soleil, et ont déterminé le rapport optimal hauteur/largeur ainsi que d'autres caractéristiques. Futrell et al. [118] ont démontré une méthode de conception par optimisation pour concevoir un bâtiment réel avec une haute performance d'éclairage naturel avec des simulations d'éclairage dynamiques basées sur le climat. Sept paramètres ont été pris en compte, notamment la forme du plafond, la hauteur du plafond, la surface de la fenêtre à claire-voie, la transmission lumineuse des fenêtres d'éclairage naturel, la transmission lumineuse des fenêtres d'observation et la longueur des stores extérieurs.

2.2.1.1.4 Ombrage

La fonction principale des stores est de réduire les gains de chaleur solaire en été. Cependant, les stores affectent également d'autres aspects de la performance, tels que l'éclairage naturel, le confort lumineux, la ventilation naturelle, etc. Par conséquent, la conception et l'optimisation des stores sont des tâches complexes. Wetter et al. [119] ont optimisé la conception passive d'un immeuble de bureaux à trois zones thermiques avec cinq variables indépendantes. Ces variables comprenaient les largeurs des fenêtres Sud et Nord, le surplomb de la fenêtre Sud, et deux points de contrôle de l'ombrage. Torres et Sakamoto [120] ont défini 21 variables de conception, y compris la taille, le nombre et les propriétés optiques de la fenêtre et de la lamelle d'ombrage pour optimiser l'ombrage fixe d'une fenêtre extérieure en utilisant Radiance comme

moteur de simulation. Les objectifs d'optimisation ont été fixés pour maximiser les économies d'énergie et réduire l'inconfort lumineux et la pénétration de la lumière du jour. Andersen et al. [121] ont proposé une approche de conception de l'éclairage naturel appelée « Lightsolve », qui utilise des mesures dynamiques de l'éclairage naturel, la méthode des segments temporels et les cartes d'irradiation spatio-temporelle (STIMAP) comme étant des méthodes principales. Manzan [122], [123] a réalisé une optimisation génétique pour déterminer la conception optimale d'un dispositif d'ombrage fixé à l'extérieur en utilisant DAYSIM pour calculer les charges d'éclairage et ESP-r pour calculer la consommation d'énergie. ModeFRONTIER, un outil d'optimisation commercial général, a été utilisé pour piloter la boucle itérative d'optimisation génétique. Les critères sont très importants dans le processus d'optimisation de la conception, dans la mesure où la lumière du jour a un impact multiple sur les environnements intérieurs. Ochoa et al. [124] ont démontré l'impact de différents critères d'optimisation sur l'espace de solution, lorsque les WWRs sont définis comme étant des variables de conception. Gianluca et Saro [125] ont effectué une analyse de sensibilité sur différents dispositifs d'ombrage et un système de vitrage. Les résultats indiquent que la taille et le type de vitrage ont un impact plus important sur les performances que l'espacement des persiennes.

Un autre problème intéressant lié aux dispositifs d'ombrage est de trouver la stratégie de contrôle optimale. Le contrôle en temps réel des dispositifs d'ombrage est un problème d'optimisation complexe qui vise à obtenir des résultats satisfaisants en matière de performance énergétique, de confort visuel, de confort thermique et de débit d'air. Le et al. [126] ont formulé une approche de contrôle optimal aveugle en utilisant une approche hybride de contrôle prédictif de modèle. Pour réduire la capacité de calcul requise, un contrôleur logique, dont les règles et les paramètres sont basés sur l'apprentissage du comportement du contrôleur optimal en utilisant des machines à vecteurs de support (SVM), a été proposé. En outre, le contrôleur appris a été évalué à l'aide de SIMBAD, une boîte à outils de Matlab. Park et al. [127] ont développé un système de contrôle optimal en temps réel basé sur le Web pour un système à double façade. La comparaison d'un système de façade intelligent avec un système de façade contrôlé manuellement a montré que le système de façade intelligent donnera de meilleures performances.

2.2.1.1.5 Ventilation naturelle

En introduisant l'air extérieur dans les bâtiments, la ventilation naturelle a l'avantage de promouvoir la qualité de l'air intérieur et de favoriser l'utilisation du « free cooling ». Zhou et Haghghat [128] ont proposé une méthode d'optimisation basée sur la simulation qui utilise la

technique de la CFD, le GA et les ANNs pour l'approximation de la surface de réponse et pour accélérer les évaluations d'aptitude dans la boucle du GA. Les résultats de l'optimisation ont montré que l'approche d'optimisation proposée est capable d'aider à améliorer la conception et le fonctionnement d'un système de ventilation dans un immeuble de bureaux. Lee [129] a fait la démonstration d'un outil de conception d'optimisation qui couple le GA et la CFD. Des variables aléatoires (conditions extérieures fluctuantes), des éléments de conception passifs (variables de modèle) et des éléments de conception actifs (systèmes CVC) ont été configurés pour représenter un environnement de bâtiment réaliste. Lors de la mise en œuvre d'un processus d'optimisation, tous les paramètres précités sont transmis au programme CFD comme étant des conditions limites pour simuler l'environnement thermique statique. À l'aide des résultats de la CFD, les fonctions objectif sont évaluées et un feedback est envoyé au GA. Ce processus se répète jusqu'à ce que les solutions optimales soient trouvées. Stavrakakis et al. [130] ont optimisé les performances de ventilation des ouvertures de fenêtres en utilisant la CFD pour prédire le modèle de flux d'air. En outre, les paires de données d'entrée-sortie de l'optimisation ont été utilisées pour produire des méta-modèles qui formulent le problème d'optimisation.

L'utilisation d'une technique CFD pour simuler la performance de ventilation est un processus long qui entrave son application dans la conception de l'optimisation. Sun et al. [131] ont développé une méthode intégrée de Relaxation Lagrangienne et de programmation dynamique stochastique dans le cadre de l'optimisation par substitution pour contrôler simultanément les stores, la ventilation naturelle et les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation afin de réaliser des économies d'énergie et d'améliorer le confort humain, plutôt que d'utiliser la méthode traditionnelle de contrôle séparé. Ils ont testé la méthodologie pour un modèle de pièce unique équipé d'un ensemble de stores, de lumières, d'une fenêtre pour la ventilation naturelle et d'un ventilo-convecteur. La méthodologie permet d'extrapoler un modèle pour une seule pièce à un bâtiment entier avec plusieurs pièces en utilisant le modèle de substitution à sous-gradient. Pour concevoir des maisons à faible coût pour les résidents urbains à faible revenu, Nguyen et Reiter [132] ont utilisé le modèle de réseau de flux d'air multizone et ont défini 18 variables continues (y compris la masse thermique, le type de sol, le système de ventilation naturelle, le type de toit, de fenêtre et de mur extérieur) ainsi que six stratégies de ventilation. Les résultats de l'optimisation ont révélé la différence entre les stratégies de conception préférables pour les bâtiments dotés d'une ventilation naturelle et les bâtiments dotés de systèmes de climatisation. Par exemple, les bâtiments à ventilation naturelle nécessitent une

orientation dominée par les vents froids, alors que les bâtiments équipés de systèmes de climatisation nécessitent une orientation privilégiant le soleil. Stephan et al. [133] ont présenté une méthode d'optimisation de la ventilation naturelle qui utilise un algorithme de réseau d'écoulement d'air multizone qui modélise la ventilation naturelle dynamique, et définit la hauteur d'ouverture comme étant une variable. Cette méthode est basée sur une analyse d'un bâtiment mécaniquement ventilé. Enfin, un calcul inverse a été effectué pour déterminer une série des hauteurs d'ouverture optimales. Le modèle de réseau aéraulique multizone est également utilisé dans [128] pour simuler les performances de ventilation. Favre et Peuportier [134] ont utilisé une méthode d'optimisation pour déterminer les stratégies optimales de contrôle de la ventilation naturelle et de la ventilation mécanique. Une simulation énergétique simplifiée avec ventilation naturelle est réalisée à l'aide d'un modèle de simulation énergétique simplifié, qui est couplé à un modèle de réseau aéraulique multizone. L'étude de cas a montré que la ventilation naturelle est plus efficace que la ventilation mécanique pour maintenir le confort dans le bâtiment pendant une vague de chaleur.

Lorsqu'il s'agit d'évaluer le débit d'air dans les bâtiments, plusieurs études ont émis l'hypothèse d'un débit de ventilation statique au lieu d'un débit d'air variable. En utilisant la qualité de l'air intérieur et l'énergie comme des critères, Rackes et Waring [135] ont établi une optimisation multi-objectif pour déterminer, en fonction du temps, le débit d'air extérieur mécanique optimal et les points de consigne de température de zone. Bambrook et al. [136] ont optimisé une maison individuelle à Sydney en utilisant comme variables l'épaisseur d'isolation d'un mur et du toit, le type de fenêtre, l'épaisseur d'un mur de masse interne et le taux de renouvellement d'air de la ventilation nocturne. Les résultats de l'optimisation ont montré qu'en hiver, la ventilation et l'infiltration sont responsables de la plus grande partie des pertes d'énergie. Quant à l'été, avec de grands murs de masse internes et une ventilation nocturne importante, le modèle de bâtiment aura un LCC plus faible. Salminen et al. [137] ont défini les heures de début et de fin de la ventilation nocturne comme l'une des variables d'optimisation lorsqu'ils ont optimisé un bâtiment candidat à la certification LEED. La disposition d'un bâtiment dans un quartier a également un impact significatif sur les performances de la ventilation naturelle. Zhou et al. [138] ont optimisé l'orientation d'une tour d'habitation et l'espace entre celle-ci et les bâtiments voisins à Chongqing, en Chine. Les résultats optimaux ont indiqué que l'âge de l'air était inférieur à 6 minutes dans 90% des pièces, contre un âge supérieur à 30 minutes dans 50% des pièces dans une conception conventionnelle.

2.2.1.1.6 Masse et inertie thermique

Les matériaux de masse thermique sont toujours utilisés pour contenir les variations de température et stocker la chaleur. Baglivo et al. [139] ont mené une analyse d'optimisation multi-objectif des murs extérieurs pour les bâtiments à énergie nulle dans le climat méditerranéen, en se concentrant sur la masse thermique et l'inertie thermique des enveloppes. Les résultats ont montré que des performances élevées peuvent être atteintes en utilisant des murs légers et minces dans les climats chauds. Ceci est très différent des stratégies de conception des murs extérieurs utilisées pour réduire les pertes de chauffage en hiver. Li et Malkawi [140] ont développé une méthode de contrôle multi-objectif, basée sur l'optimisation et la prédiction de modèle pour la masse thermique des bâtiments, visant à déplacer la charge de climatisation des heures de pointe vers les heures creuses. En utilisant les systèmes proposés de contrôle par prédiction de modèle, les économies de coûts énergétiques allaient de 20 à 60% pour différentes villes avec différentes conditions tarifaires. Huang et al. [141] ont développé une méthode d'optimisation de la conception d'un environnement intérieur humide en utilisant un GA et une méthode de simulation des transitoires d'humidité. La quantité et la disposition des matériaux tampons d'humidité ont été définies comme étant des variables de conception. Les résultats ont montré que la méthode proposée est utile pour optimiser l'humidité intérieure.

2.2.1.1.7 Discussion

La conception d'une forme de bâtiment exige le respect de normes et une réflexion créative qui dépasse largement les capacités des techniques actuelles d'optimisation de la conception. La moitié des études portant sur l'optimisation de la conception des formes de bâtiments se limitent à des formes simples. Tous les toits complexes générés ont des formes étranges [92], [93], [95], qui peuvent ne pas être acceptables pour les ingénieurs civils et les clients en raison du coût supplémentaire. Actuellement, les méthodes d'optimisation ne peuvent être employées que pour fournir une méthode alternative. Par conséquent, cette approche n'est pas assez répandue au niveau de la conception des bâtiments. L'optimisation de la conception de l'enveloppe du bâtiment à travers ses éléments passifs, à savoir les parois opaques, les parois vitrées, les dispositifs d'ombrage, la ventilation, etc. est couramment pratiquée, dans la mesure où sa mise en œuvre est à la fois réalisable et relativement simple.

2.2.1.2 Fonctions objectif

Les fonctions objectif représentent une dénomination souvent utilisée en optimisation mathématique et en recherche opérationnelle, désignant une fonction qui sert de critère pour déterminer la meilleure solution à un problème d'optimisation. Dans le bâtiment, ces fonctions

correspondent aux critères de choix du propriétaire du bâtiment. Ces critères sont généralement définis sous la forme d'indicateurs de performance, appelés indicateurs clés de performance des bâtiments.

Un indicateur est un paramètre ou une valeur construite à partir de paramètres donnant une information synthétique sur un système ou un phénomène. Il peut être descriptif, comme il peut participer à l'élaboration d'une décision. Selon Maystre et Bollinger [142], un indicateur est un ensemble de données de natures différentes, agrégées en une caractéristique plus synthétique et facilement compréhensible. Pour l'IFEN [143], la notion d'indicateur est un élément qui simplifie l'information issue de phénomènes complexes et la quantifie de manière à la rendre significative à l'échelle souhaitée. Il peut être qualitatif ou quantitatif, défini sur une échelle de valeurs discrètes ou continues, et aussi fermé ou ouvert (exemple d'échelle ouverte : intensité d'un séisme sur l'échelle de Richter). Un indicateur peut servir à différentes finalités : évaluer une situation à un moment donné, évaluer l'évolution d'un système au fil du temps, comparer plusieurs actions dans une logique de décision, etc. Le terme « indicateur » peut donc être défini de différentes manières, chaque organisation lui donnant sa propre définition, en fonction de son utilisation [144]. Toutefois, ces définitions sont généralement similaires et tournent autour de la notion d'aide à la décision.

Dans la littérature [145], [146], il existe de nombreux indicateurs permettant d'évaluer la performance des bâtiments. Ces indicateurs peuvent être répartis en trois grandes familles thématiques, à savoir les aspects énergétiques et environnementaux, les aspects économiques et les aspects sociaux et sociétaux. La liste des indicateurs de performance présentée ci-après est loin d'être exhaustive. L'intérêt consiste à identifier, de manière synthétique, les aspects performantiels les plus utilisés par la communauté scientifique dans le cadre de l'évaluation de la performance des bâtiments.

2.2.1.2.1 Aspects énergétique et environnemental

2.2.1.2.1.1 Indicateurs énergétiques

Les indicateurs de performance énergétique sont ceux les plus utilisés dans le secteur de la construction de bâtiments. Depuis les chocs pétroliers des années 1970 (1973 et 1979), l'avènement des réglementations thermiques et l'apparition de la contrainte énergétique, de nombreux dispositifs, outils et méthodes ont été développés pour quantifier la performance énergétique. Pour connaître les performances énergétiques d'un bâtiment, il est nécessaire d'établir au préalable un bilan thermique de ses locaux. Ce bilan doit prendre en compte les déperditions par conduction, convection, rayonnement à travers l'enveloppe du bâtiment, par

renouvellement d'air ainsi que les apports solaires et les charges internes (produites par les occupants, l'éclairage, les électroménagers, etc.). Ce bilan permet de calculer les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation. Ces besoins représentent la différence entre les déperditions et les gains thermiques.

Sur le plan réglementaire, la performance énergétique des bâtiments est évaluée grâce au calcul de la consommation énergétique du bâtiment, portant sur cinq postes principaux, à savoir : le chauffage, le refroidissement, l'éclairage, l'eau chaude et les auxiliaires. Il est important de noter que cette consommation [147]–[149] se distingue techniquement des besoins énergétiques [150], [151]. La norme NF EN 13790 [152] explique la différence entre les besoins et la consommation appliquée au chauffage et au refroidissement.

- ✓ Les besoins énergétiques pour le chauffage et/ou le refroidissement : « La chaleur à fournir ou à extraire d'un espace conditionné pour maintenir les conditions de température souhaitées pendant une période donnée ».
- ✓ La consommation énergétique pour le chauffage et/ou le refroidissement des locaux : « L'énergie apportée au système de chauffage et/ou de refroidissement pour répondre respectivement aux besoins énergétiques de chauffage et/ou de refroidissement ».

Le calcul des besoins énergétiques ne tient donc pas compte du système qui maintient les conditions et donc de ses performances. Ils caractérisent l'enveloppe du bâtiment d'un point de vue thermique et aérodynamique. Au contraire, la consommation prend en compte le système de production et le type d'énergie utilisé.

Les indicateurs énergétiques peuvent généralement être décrits comme suit :

- ✓ Les besoins de chaleur pour le chauffage et/ou la climatisation [150], [151], [153] ;
- ✓ La consommation annuelle normalisée d'énergie pour le chauffage [147], [148];
- ✓ La consommation d'énergie finale sur différents usages [154], [155];
- ✓ La consommation d'énergie grise [156];
- ✓ Les économies d'énergie par la réhabilitation [157];
- ✓ La consommation d'énergie primaire sur le cycle de vie [158].

2.2.1.2.1.2 Indicateurs environnementaux

En vue de progresser vers un usage rationnel de l'énergie, il est devenu essentiel d'identifier les dommages environnementaux. Lors de la construction ou de la réhabilitation d'un bâtiment, et

aussi pendant tout son cycle de vie, plusieurs impacts sur l'environnement peuvent être identifiés. En termes de réduction des impacts environnementaux, une différenciation apparaît entre les approches monocritères, centrées sur un enjeu jugé prédominant, et les travaux multicritères, où les critères suivants sont considérés :

- ✓ Potentiel de changement climatique [147], [159] ;
- ✓ Potentiel d'acidification atmosphérique [147], [160];
- ✓ Consommation d'eau [160];
- ✓ Consommation cumulée d'exergie [161];
- ✓ Impacts environnementaux sur le cycle de vie [158], [162].

Le 4^{ème} critère concerne la notion de l'exergie, qui constitue un élément très important de toute stratégie visant à la caractérisation globale de la performance énergétique et environnementale du bâtiment. En effet, l'exergie est définie comme étant « le travail maximal théorique pouvant être extrait de l'ensemble formé par le système étudié et l'environnement quand le système passe d'un état donné à l'équilibre avec l'environnement » [163]. L'exergie est une mesure extensive de l'irréversibilité des phénomènes, permettant de caractériser une forme d'épuisement des ressources naturelles. C'est une combinaison de la consommation de ressources naturelles et des émissions. L'épuisement des ressources énergétiques peut être inclus, comme il ne l'est pas. La consommation d'exergie cumulée est alors la différence, cumulée sur le cycle de vie, entre la consommation d'exergie due à la consommation de ressources et l'exergie liée au traitement des émissions [161].

Ces critères permettent de définir une variété d'indicateurs environnementaux, qui peuvent apporter une dimension particulière à l'ensemble du cycle de vie environnemental du bâtiment. Ces indicateurs peuvent être évalués aussi bien à l'échelle des procédés (à partir des bases de données de l'Etat, ou des fabricants), qu'à l'échelle du bâtiment à l'aide d'outils d'analyse du cycle de vie environnemental (EQUER, ELODIE, etc.), afin d'obtenir certains labels de performance.

2.2.1.2.2 Aspects économiques

L'analyse économique et financière est un élément clé pour l'évaluation d'un projet de construction ou de réhabilitation. Cette analyse se caractérise par la mise en place d'une grande variété d'indicateurs. Cette gamme d'indicateurs est couramment utilisée dans la littérature pour

évaluer la faisabilité d'un projet ou pour pondérer les choix techniques par rapport à l'aspect financier, y compris :

- ✓ Coût d'investissement [150], [164];
- ✓ Coût de la rénovation [157];
- ✓ Coût de maintenance en exploitation [147], [164] ;
- ✓ Coût d'usage [147];
- ✓ Valeur verte [165];
- ✓ Coût des économies d'énergie [166];
- ✓ Temps de retour sur investissement [167] ;
- ✓ Valeur actuelle nette (VAN) des investissements [166];
- ✓ Taux de rentabilité interne (TRI) des investissements [166];
- ✓ Taux d'enrichissement en capital apparent – Méthode TEC [168];
- ✓ Durée de vie économique [164], [169];
- ✓ Coût global sur le cycle de vie [161].

La valeur verte désigne « la valeur immobilière nette additionnelle d'un bien immobilier en fonction de sa performance environnementale » et permet de soutenir l'investissement en considérant le bénéfice financier au regard de la valeur immobilière du bâtiment considéré [165].

La méthode du Taux d'Enrichissement en Capital (TEC) [168] permet de réaliser une analyse économique de la rentabilité globale des investissements, et pas seulement de la rentabilité des fonds propres engagés. Elle est particulièrement intéressante pour comparer des projets d'investissement partiellement subventionnés et générant des revenus commerciaux potentiels par la vente de produits ou de services (par exemple, la production d'électricité d'une centrale photovoltaïque).

La durée de vie des bâtiments est généralement considérée dans ses dimensions physiques ou fonctionnelles. Elle reflète respectivement la dégradation progressive des performances physiques et mécaniques initiales ou la capacité fonctionnelle à répondre à l'usage prévu [170]. La durée de vie économique est relative à la valeur du bien en tant que produit économique [169]. Elle est évaluée sur la base de l'offre et de la demande ou de l'équilibre d'exploitation. La

fin de vie du bâtiment est alors atteinte si la demande n'existe plus ou si les coûts d'exploitation ne sont plus compensés par les bénéfices de l'utilisation. En ce sens, la durée de vie économique est davantage liée à l'évolution du marché qu'à l'âge des bâtiments.

Ces indicateurs permettent d'apporter une lumière différente sur la nature et l'interprétation de la performance économique et financière des bâtiments étudiés. Certains d'entre eux se concentrent uniquement sur les montants des investissements. Ils répondent alors à la vision première du propriétaire ou de l'investisseur qui cherche à maîtriser les capitaux engagés.

D'autres permettent d'évaluer les avantages économiques de la conception pendant la phase d'exploitation. Dans ce cas, ils reflètent les intérêts des différentes parties prenantes, propriétaires ou occupants, qui sont potentiellement différents. Si les coûts d'entretien, la valeur verte, etc. intéressent directement les propriétaires, les coûts d'utilisation sont des critères plus pertinents pour les locataires. Enfin, l'analyse économique et financière peut être réalisée de manière plus globale sur le cycle de vie de la structure et intégrer à la fois les coûts d'investissement et les coûts financiers ou les économies générées par la conception, en exploitation : coût global sur le cycle de vie, coût des économies d'énergie, valeur actuelle nette, taux de rentabilité interne des investissements, temps de retour sur investissement ou encore durée de vie économique.

Notons qu'en matière de réhabilitation énergétique, les investissements permettent une réduction des dépenses plutôt que des gains nets réels. Dans ce cas, la valeur actuelle nette est égale au coût global actualisé [168].

Dans l'aide à la décision, il semble donc pertinent d'introduire une combinaison d'indicateurs, représentant la vision des différents acteurs tant du point de vue des investissements que de l'utilisation du bâtiment, sur son cycle de vie.

2.2.1.2.3 Aspects sociaux et sociétaux

Les bâtiments sont a priori construits pour offrir des espaces intérieurs propices au développement des activités de leurs occupants. Ces occupants, selon le CSTB, passent environ 90% de leur temps dans des espaces clos, dont une très grande partie dans des bâtiments. Ainsi, des critères de confort et plus généralement de qualité des espaces intérieurs doivent être satisfaits afin d'assurer des conditions sanitaires, de sécurité et de confort acceptables.

De nombreux indicateurs ont été proposés par la communauté scientifique, les règlements de construction et les labels de performance pour évaluer les impacts sociaux et sociétaux d'un projet de construction ou de rénovation. Il s'agit notamment du confort thermique, du confort

visuel, du confort acoustique, de la qualité de l'air et d'autres aspects liés à la fonctionnalité et à la sécurité.

2.2.1.2.3.1 Confort thermique

Plusieurs approches d'évaluation du confort thermique ont été proposées dans la littérature. La méthode la plus simple consiste à calculer l'inconfort à partir de la température de l'air ou de la température opérative. Cette dernière présente l'avantage d'inclure la convection et le rayonnement des parois et permet donc une meilleure modélisation de la température ressentie par l'occupant. Dans ce cas, deux caractéristiques principales du confort peuvent être illustrées.

- ✓ La durée de l'inconfort pendant laquelle le seuil de confort est dépassé ;
- ✓ L'intensité du confort (exprimée en degrés heures) qui est définie comme étant l'intégrale de la différence entre la température opérative et le seuil de confort sur la période d'occupation.

Selon les travaux de Fanger [171], il a été constaté que la sensation de confort par les occupants ne dépend pas seulement de la température intérieure, mais aussi de la préférence de chaque individu. C'est sur cette base que la norme NF EN ISO 7730 a introduit deux indices pour l'évaluation du confort thermique des occupants, à savoir le PMV et le PPD, comme expliqué dans la section 1.3.1.1.3.

Cette méthode reste limitée aux conditions de l'expérience (local, nombre de participants, etc.). Pour cette raison, des travaux plus récents ont utilisé l'approche dite adaptative [47], [172], [173], qui consiste à calculer une température moyenne glissante qui modélise l'adaptation des occupants à leur environnement. Dans la même optique, et conformément à cette approche, nous avons proposé un nouvel logigramme pour le calcul des heures d'inconfort effectives (Voir Figure 2.3) [61], [174].

Comme présenté dans la section 1.3.1.1.3, il est généralement admis de quantifier la sensation de confort en utilisant l'échelle de -3 à +3, proposée par Fanger et formalisée par la norme internationale ISO 7730, comme présenté dans le Tableau 1.1, basée sur l'équilibre thermique du corps humain. L'équilibre thermique est atteint lorsque la production de chaleur interne du corps est égale à la perte de chaleur vers l'environnement. Dans un environnement modéré, le système de thermorégulation humain va automatiquement tenter de modifier la température de la peau et la sécrétion de sueur pour maintenir l'équilibre thermique.

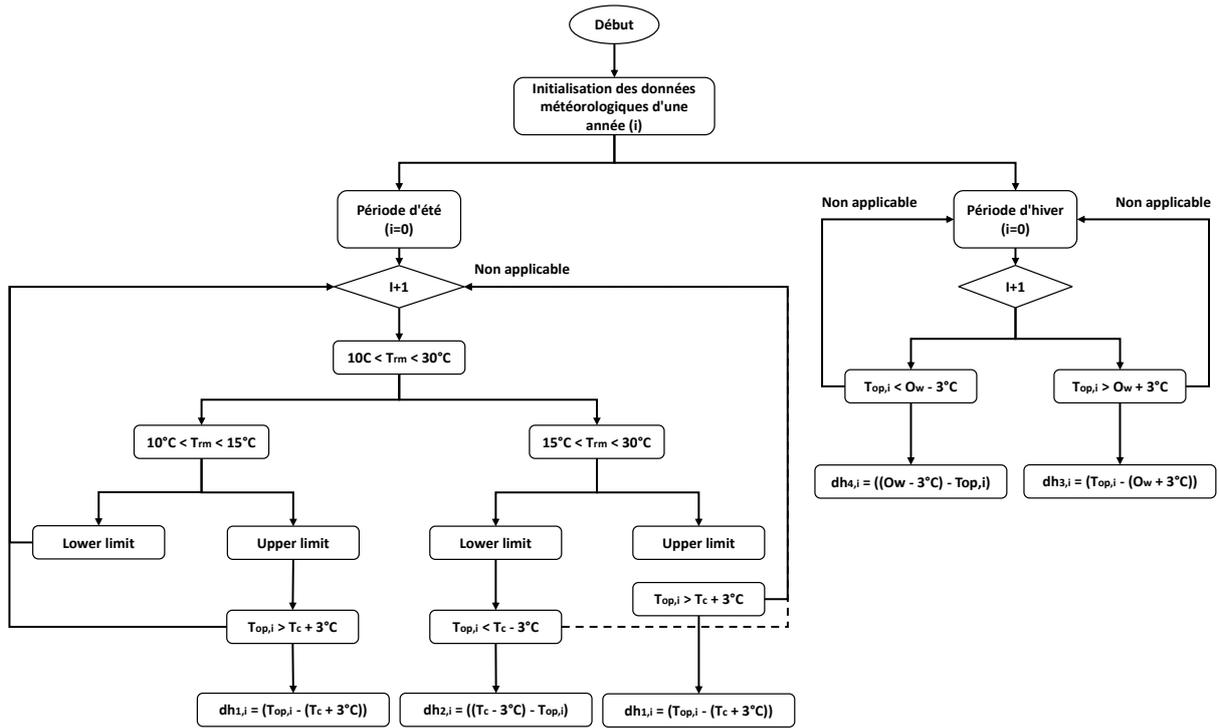


Figure 2.3. Logigramme de calcul des heures d'inconfort.

Tableau 2.1. Description de l'applicabilité des catégories utilisées.

Catégorie I	Niveau d'exigence élevé et recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles ayant des exigences particulières, telles que les personnes handicapées, les malades, les jeunes enfants et les personnes âgées.
Catégorie II	Niveau d'exigence normal et devrait être utilisé pour les nouveaux bâtiments et les rénovations.
Catégorie III	Un niveau d'exigence acceptable et modéré et peut être utilisé pour les bâtiments existants.

Selon la norme EN 15251, une température de fonctionnement T_{op} est considérée comme confortable lorsqu'elle se situe entre une limite supérieure et une limite inférieure, définies en fonction de la température moyenne courante externe T_{rm} , selon la catégorie à laquelle appartient le bâtiment en question (voir Tableau 2.1). Par conséquent, les règles recommandées par cette norme sont destinées à calculer la température de confort de la manière suivante [175]:

$$T_{rm} < 10^{\circ}\text{C} \quad \begin{cases} \text{Limite supérieure : Non applicable} \\ \text{Limite inférieure : Non applicable} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

$$10^{\circ}\text{C} < T_{rm} < 15^{\circ}\text{C} \quad \begin{cases} \text{Limite supérieure : } T_c = 0.33T_{rm} + 18.8 \\ \text{Limite inférieure : Non applicable} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

$$15^{\circ}\text{C} < T_{rm} < 30^{\circ}\text{C} \quad \begin{cases} \text{Limite supérieure : } T_c = 0.33T_{rm} + 18.8 \\ \text{Limite inférieure : } T_c = 0.33T_{rm} + 18.8 \end{cases} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

$$T_{m} > 30^{\circ}\text{C} \quad \begin{cases} \text{Limite supérieure : Non applicable} \\ \text{Limite inférieure : Non applicable} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Il convient de noter que les trois limites d'acceptation (catégories I, II et III) sont définies par l'Eq. (2.5), l'Eq. (2.6) et l'Eq. (2.7) :

$$\text{Catégorie I} \quad \begin{cases} \text{Limite supérieure : } T_{\text{op}} = T_{\text{c}} + 2 \\ \text{Limite inférieure : } T_{\text{op}} = T_{\text{c}} - 2 \end{cases} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

$$\text{Catégorie II} \quad \begin{cases} \text{Limite supérieure : } T_{\text{op}} = T_{\text{c}} + 3 \\ \text{Limite inférieure : } T_{\text{op}} = T_{\text{c}} - 3 \end{cases} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

$$\text{Catégorie III} \quad \begin{cases} \text{Limite supérieure : } T_{\text{op}} = T_{\text{c}} + 4 \\ \text{Limite inférieure : } T_{\text{op}} = T_{\text{c}} - 4 \end{cases} \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Où T_{m} , la température moyenne courante extérieure, est la moyenne pondérée de la température de l'air extérieur des 7 derniers jours, qui est calculée à l'aide de l'Eq. (2.8) :

$$T_{m} = \frac{(T_{ed-1} + 0.8T_{ed-2} + 0.6T_{ed-3} + 0.5T_{ed-4} + 0.4T_{ed-5} + 0.3T_{ed-6} + 0.2T_{ed-7})}{3.8} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Les degrés d'inconfort sont définis comme la somme des heures pendant lesquelles la température opérationnelle est en dehors de la fourchette [$T_{\text{c}} - 3^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{c}} + 3^{\circ}\text{C}$] en période estivale, et en dehors de la fourchette [$\theta_{\text{w}} - 3^{\circ}\text{C}$, $\theta_{\text{w}} + 3^{\circ}\text{C}$] en période hivernale, pendant une année de simulation (8760h). Ceci est calculé selon l'Eq. (2.9), fondée sur l'algorithme présenté à la Figure 2.3 :

$$DH = \sum_{i=1}^{i=8760} dh_{1,i} + dh_{2,i} + dh_{3,i} + dh_{4,i} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

Où $T_{\text{op},i}$ est la température opératoire au centre de la zone thermique, T_{c} est la température de confort calculée à l'aide de l'Eq. (2.1), l'Eq. (2.2), l'Eq. (2.3) et l'Eq. (2.4), Δt est un laps de temps de 1 heure.

2.2.1.2.3.2 Confort visuel

Le confort d'éclairage dépend du niveau d'éclairement, de la proportion de lumière du jour et de l'éblouissement de l'occupant. La demande en éclairage varie en fonction de l'activité assignée aux espaces intérieurs. La norme NF X35-103 [176] définit les niveaux d'éclairement en distinguant les types de bâtiments (logements, bureaux, industrie, écoles, centres

commerciaux, etc.) et les activités exercées à l'intérieur des espaces, pour chaque application. La conception des bâtiments tient donc compte des valeurs d'éclairage recommandées.

Cependant, la lumière ne se limite pas à un niveau d'éclairage. En effet, la décomposition spectrale joue notamment un rôle important dans la sensation de confort, perçue par les occupants, soulignant l'importance de la lumière naturelle [177]. Ainsi, de nombreux travaux quantifient l'exploitation de la lumière naturelle par le facteur de lumière du jour [150], [178]. Ce facteur est défini comme le rapport entre l'éclairage naturel mesuré dans un bâtiment et l'éclairage horizontal extérieur, qui est constant pour un ciel et un environnement donnés (obstructions, position des stores, réflectivité des murs, mobiliers, etc.) [179]. D'autres indicateurs comme le pourcentage d'autonomie ou le facteur lumière du jour, rapport entre l'éclairage naturel et artificiel, ont été utilisés pour qualifier les performances en termes de confort visuel [147].

Enfin, il est important de contrôler l'éblouissement dû à la lumière directe du soleil. En pratique, les problèmes d'éblouissement sont facilement résolus par l'occupant à l'aide de protections solaires (volets ou stores) et d'éclairage artificiel. Le niveau d'éblouissement en tant qu'indicateur a été considéré dans diverses études de conception, comme par exemple l'étude menée par Becker et al. [180]. Cependant, ils entraînent une augmentation de la consommation d'énergie et une dégradation du confort par une moindre utilisation de la lumière naturelle.

2.2.1.2.3.3 Confort acoustique

Le confort acoustique est souvent modélisé par des performances à l'échelle des éléments de l'enveloppe ou des pièces de vie, pour lesquelles certaines performances minimales réglementaires sont exigées selon le type de bâtiment et d'usage. Cependant, les spécificités d'un projet par rapport au site, à l'activité accueillie, etc., peuvent justifier une conception dépassant les niveaux réglementaires. Le traitement acoustique vise notamment l'isolation aux bruits extérieurs, aux bruits aériens provenant des locaux contigus, aux bruits de chocs (bruits de pas ou de déplacement d'objets dans les étages) et aux bruits générés par des équipements (chauffage, ventilation, etc.) [181]. Les niveaux d'isolation acoustique en dB [147] et les indices de classification du bruit [182] permettent de comparer les conceptions en termes de confort acoustique pour les occupants.

2.2.1.2.3.4 Qualité de l'air intérieur

La qualité de l'air intérieur est une préoccupation croissante dans la conception des bâtiments, liée au temps passé dans les espaces intérieurs et à l'identification des émissions polluantes

telles que les composés organiques volatils (COV). En particulier, il est important de prévenir l'entrée de polluants extérieurs dans les bâtiments ainsi que les émissions gazeuses liées aux produits de finition (peintures) ou aux mobiliers, d'assurer le renouvellement de l'air intérieur en garantissant l'évacuation des polluants (dont le CO₂ lié à la respiration des occupants) et de limiter la prolifération bactérienne [181].

Des indicateurs sur la concentration de CO₂ dans l'air intérieur [183], [184], la proportion maximale entre la concentration moyenne d'un polluant donné et une valeur limite d'exposition à court ou long terme [185], le taux de renouvellement de l'air [185], sont classiquement étudiés dans la conception des bâtiments pour progresser en termes de qualité de l'air intérieur.

2.2.1.2.3.5 Autres indicateurs

Outre les aspects sanitaires ou de confort, d'autres indicateurs ont été introduits pour caractériser la qualité d'usage des espaces, la gêne occasionnée par les travaux de réhabilitation, la sécurité des ouvrages réhabilités, etc :

- ✓ Fonctionnalité de la mise en œuvre des techniques de réhabilitation [159];
- ✓ Durée des travaux de construction et/ou de réhabilitation [164];
- ✓ Fonctionnalité, influence par la réduction d'espace habitable [159];
- ✓ La sécurité incendie, etc. [186].

Enfin, même si leur pertinence n'est pas remise en cause, l'introduction d'indices sur le développement des sociétés (ex : indice de développement humain) est plutôt réservée à l'analyse sectorielle globale de la construction sur un territoire donné [187]. Elle semble moins adaptée à l'étude de projets spécifiques de réhabilitation de bâtiments.

2.2.1.2.4 Discussion

Comme présenté, de nombreux indicateurs de performance existent et sont couramment utilisés pour évaluer la performance d'une construction ou d'un sous-système de construction. La plupart des indicateurs énumérés dans cette section sont dérivés de la sortie de codes de calcul qui nécessitent une quantité importante de données d'entrée pour être évalués. En amont de la conception d'une opération de rénovation, la grande quantité d'informations nécessaires pour alimenter ces codes n'est généralement pas définie. Leur utilisation est donc discutable dans une logique orientée davantage vers la constitution de scénarios d'amélioration que vers une évaluation quantifiée des performances.

Sans prétention à l'exhaustivité, ce bref aperçu de ces indicateurs souligne la diversité des critères utilisés pour la conception des bâtiments et l'évaluation de leurs performances dans leurs différentes dimensions. La problématique de la conception des programmes de réhabilitation apparaît nécessairement multicritères.

En outre, il semble difficile d'identifier une solution globale qui optimise tous les critères simultanément. Certains des critères de décision sont de nature à imposer des compromis, comme dans le cas, par exemple, du coût d'investissement et de la performance énergétique.

Enfin, la perspective du développement durable et la nécessité d'une approche systémique incitent à considérer les indicateurs sur le cycle de vie plutôt que sur une phase particulière, à l'échelle du système global plutôt que sur une restriction à un sous-système, lui-même en interaction.

2.2.2 Pré-optimisation

Dans ce rapport de thèse, le terme « pré-optimisation » désigne la phase qui précède le processus d'optimisation. Plus concrètement, c'est la phase qui fait le lien entre la formulation du problème considéré et son optimisation. Ce lien est assuré par deux passages possibles : passage direct ou passage par la méta-modélisation.

2.2.2.1 Passage direct

Dans toute démarche d'optimisation des performances des bâtiments, qu'elle soit mono ou multi-objectif, trois étapes sont nécessaires, à savoir la formulation du problème d'optimisation, une phase intermédiaire de pré-optimisation et enfin l'optimisation. Or, la phase intermédiaire n'existe pas dans le passage direct, dans la mesure où il existe des moyens qui abordent le processus d'optimisation dans sa globalité sans prendre en compte cette phase dans certains cas spécifiques. Ces moyens sont souvent des outils qui permettent de réaliser les simulations thermiques dynamiques, tels que TRNSYS, EnergyPlus, DOE-2, etc.

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

- ✓ Les outils simplifiés qui sont basés sur des modèles analytiques prenant en compte des phénomènes physiques simples (la conduction) et introduisant des facteurs de corrélation pour les aspects dynamiques.

- ✓ Les outils de STD qui utilisent des modèles par éléments finis, volumes finis ou différences finies, ainsi que la méthode des fonctions de transfert en intégrant des modèles pour tous les principes physiques régissant les transferts thermiques (Joe Clarke, 2001) [94]. Les résultats obtenus en quelques secondes à quelques minutes sont plus précis et plus détaillés. La simulation intègre les apports solaires, les apports internes, les échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement ainsi que les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur, en tenant compte de l'inertie thermique des différentes zones. De nombreux outils de simulation thermique dynamique existent pour évaluer les besoins en chauffage et en climatisation des bâtiments, tels que TRNSYS, DOE-2, EnergyPlus, SERIRES, ESP-r, SPARK, COMFIE, CoDyBa, etc.

Dans la littérature, de nombreuses études ont été menées au sujet de l'optimisation des performances des bâtiments, en faisant appel à des approches à passage direct [188]–[191]. Celles-ci ont été accomplies grâce à l'utilisation de différents programmes d'optimisation intégrés dans des outils de STD, tels que jEPlus+EA pour EnergyPlus, GenOpt pour TRNSYS, etc.

2.2.2.2 Passage par la méta-modélisation

Le passage par la méta-modélisation réside dans le fait de relier la formulation du problème considéré à son optimisation à travers un méta-modèle, décrivant de manière efficace le comportement des différentes fonctions cibles du problème en question. En effet, lorsqu'on se réfère à un méta-modèle ou à un modèle réduit, on fait implicitement référence aux fameux modèles de substitution, qui représentent une approximation d'une fonction dont l'évaluation est coûteuse. L'évaluation du modèle de substitution est quant à elle très rapide, ce qui permet d'avoir en tout point de l'espace une estimation de la valeur de la fonction coûteuse sans avoir à l'évaluer réellement. La construction d'un modèle de substitution est réalisée à partir de quelques échantillons de la fonction initiale, sans aucun a priori sur sa physique ou ses particularités.

Le modèle de substitution, que nous désignerons par f , doit effectuer un apprentissage supervisé de la fonction coûteuse $f: \mathbb{R}^{nx} \rightarrow \mathbb{R}$ sur un espace $X \subseteq \mathbb{R}^{nx}$ donné. Le principe est d'apprendre à prédire automatiquement le comportement de cette fonction à partir de quelques exemples qui sont fournis. Le modèle doit être capable de généraliser de manière raisonnable ce qu'il a appris à partir des échantillons, afin de pouvoir estimer la valeur de la fonction pour tout point d'entrée.

L'apprentissage est réalisé à partir d'une base d'apprentissage constituée de n_s échantillons sous la forme de couples (s^i, u^i) , avec $s^i = (s^i_1, s^i_2, \dots, s^i_n) \in X \subseteq \mathbb{R}^{n_x}$ et $u^i \in \mathbb{R}$. L'ensemble des valeurs d'entrée des échantillons est noté $S = (s^1, s^2, \dots, s^{n_s}) \in M_{n_s, n_x}(\mathbb{R})$, et l'ensemble de leurs images par f est noté $u = (u^1, u^2, \dots, u^{n_s}) \in \mathbb{R}^{n_s}$. Pour chaque échantillon i , on a donc $u^i = f(s^i) \in \mathbb{R}$.

Avant de construire un modèle de substitution, il est préférable de normaliser les échantillons d'apprentissage. En effet, les meilleurs résultats sont obtenus lorsque les données sont réduites à un intervalle restreint, tant pour les entrées S que pour les sorties u . Cela garantit que les différentes variables auront la même influence sur le modèle (surtout dans le cas où l'un des champs de variation est beaucoup plus grand que les autres), et permet également au modèle de ne traiter que des valeurs « raisonnables » (ce qui évite de saturer ses paramètres). Deux types de normalisation existent : d'une part, la normalisation à l'intervalle $[-1, 1]$, et d'autre part, la normalisation gaussienne visant à centrer et réduire les données. L'un ou l'autre peut être utilisé indifféremment dans la plupart des cas.

Pour représenter la fonction initiale à partir de la base d'apprentissage (S, u) , il existe différentes familles de modèles de substitution. Elles se distinguent par les fonctions génératrices et les techniques d'apprentissage qu'elles utilisent. Selon le cas, ils permettent de réaliser une interpolation ou une régression sur les échantillons, et peuvent modéliser un degré plus ou moins élevé de non-linéarité. Dans la littérature, il existe de nombreux types de modèles de substitution, dont trois sont les plus utilisés actuellement, à savoir les approximations polynomiales, les réseaux neuronaux et le Krigeage.

2.2.2.2.1 Polynômes

Les modèles basés sur des approximations polynomiales sont les modèles les plus simples. Ils sont parfois historiquement associés au terme « surface de réponse » car ils étaient à l'origine utilisés comme aide à l'optimisation. Une approximation polynomiale f s'écrit comme un polynôme multivarié avec n_x variables et un degré k fixe :

$$f(x) = \sum_{\alpha: \|\alpha\|_1 \leq k} c_\alpha x^\alpha \quad \text{Eq. (2.10)}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} x = (x_1, x_2, \dots, x_{n_x}) \in \mathbb{R}^{n_x} \\ \alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_x}) \in \mathbb{N}^{n_x} \\ \|\alpha\|_1 = \sum_{i=1}^{n_x} \alpha_i \\ c_\alpha \in \mathbb{R} \\ x^\alpha = \prod_{i=1}^{n_x} x_i^{\alpha_i} \end{array} \right. \quad \text{Eq. (2.11)}$$

Un polynôme est donc simplement une somme de monômes x pondérés par des coefficients c à déterminer. Un polynôme de degré trois à deux variables peut par exemple s'écrire :

$$f(x_1, x_2) = 3 + 2x_1 - x_2^2 + x_1^2 x_2 \quad \text{Eq. (2.12)}$$

La base polynomiale standard est composée des monômes x^α , mais il existe aussi des modèles polynomiaux construits sur des bases différentes, comme par exemple le cas des polynômes du chaos qui utilisent notamment les bases de Hermite ou de Legendre. Les bases polynomiales sont dans tous les cas uniquement composées de puissances de x et les modèles peuvent donc être réécrits sous la forme générale, comme le montre l'Eq. (2.12).

Pour établir une approximation polynomiale d'une fonction, il est nécessaire de déterminer les coefficients c_α . Il faut donc disposer d'au moins autant d'échantillons de la fonction à approximer. Le calcul de ces coefficients peut se faire simplement en résolvant un système d'équations linéaires. Si le nombre d'échantillons disponibles est égal au nombre de coefficients du modèle, on obtient un modèle interpolant. Néanmoins, le nombre d'échantillons peut également être plus important pour construire un modèle de régression. Les coefficients sont alors déterminés en résolvant un problème d'optimisation visant à minimiser la distance entre le modèle et les échantillons. Cela se fait généralement par la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser le carré de la distance euclidienne entre les échantillons et leur valeur estimée par le modèle. La difficulté avec les modèles polynomiaux est que le nombre de coefficients c_α à évaluer croît très rapidement en fonction de la dimension de l'espace d'entrée et du degré du polynôme, ce qui rend le problème de leur évaluation encore plus complexe.

L'établissement d'un modèle polynomial se fait donc par la résolution d'un système d'équations linéaires qui peut être surdéterminé (ou même sous-déterminé). Si on note c le vecteur des coefficients c_α à déterminer, le système à résoudre est le suivant :

$$A.c = u \quad \text{Eq. (2.13)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \left[\left(s^i \right)^\alpha \right]_{1 \leq i \leq n_s, \|\alpha\| \leq k} \\ c = (c_\alpha)_{\|\alpha\| \leq k} \\ u = (u^i)_{1 \leq i \leq n_s} \end{array} \right. \quad \text{Eq. (2.14)}$$

Lorsque le système possède un nombre différent d'équations et d'inconnues, la résolution se fait par la méthode des moindres carrés. Un exemple à ce propos a été abordé par Baudouin [192], en utilisant la bibliothèque Lapack [193].

Pour pallier l'augmentation du nombre de coefficients à déterminer lorsque l'ordre du modèle augmente, il est possible d'utiliser des polynômes dits « creux ». Il s'agit de modèles dans lesquels tous les monômes x^α ne sont pas nécessairement présents (certains coefficients c_α restent nuls). La détermination des coefficients en nombre limité est donc plus simple, mais il est nécessaire de déterminer intelligemment quels monômes inclure ou non dans la formulation afin de pouvoir représenter correctement la fonction à approximer.

L'intérêt des modèles polynomiaux réside dans leur simplicité, tant dans leur construction que dans leur utilisation. Selon l'ordre du modèle, certains points particuliers peuvent également être calculés (comme par exemple le calcul de l'extremum d'un polynôme d'ordre 2). Les polynômes permettent de réaliser de bonnes approximations locales d'une fonction, mais sur de plus grandes surfaces on se heurte rapidement à des problèmes de représentation des extrema locaux : un polynôme d'ordre 2 n'a par exemple qu'un seul extremum, et ne peut donc pas approximer correctement une fonction avec deux minima. Des oscillations artificielles peuvent également apparaître lorsque le degré du modèle polynomial utilisé est trop important. En conséquence, on les utilisera principalement pour établir des modèles locaux simples et rapides sur une zone de confiance donnée.

2.2.2.2 Réseaux de neurones

Les réseaux neuronaux constituent un deuxième type de modèle de substitution qui peut être utilisé pour approximer une fonction. Un réseau de neurones artificiels est un modèle qui s'inspire de manière schématique du fonctionnement des neurones biologiques. Bien qu'il soit utilisé dans de nombreuses applications différentes [194], nous nous concentrerons dans ce rapport uniquement sur ses capacités d'approximation de fonctions. Nous commencerons par

décrire le fonctionnement d'un neurone artificiel, pour ensuite les assembler en un réseau multicouche, appelé « Multi Layer Perceptron » (MLP).

2.2.2.2.1 Neurone artificiel

Un neurone est une entité qui possède plusieurs entrées $a_i \in \mathbb{R}$ (qui peuvent être regroupées dans un vecteur $a = (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}$) et une sortie réelle z qui dépend de ces entrées. Pour calculer la valeur de sa sortie, le neurone effectue une somme pondérée de ses entrées (chaque entrée étant affectée d'un poids $w_i \in \mathbb{R}$ et d'un biais w_0) avant d'appliquer une fonction d'activation t :

Le comportement d'un neurone dépend donc du vecteur de réels $w = (w_0, w_1, \dots, w_n)$ et de la fonction t . Les fonctions d'activation les plus utilisées sont les suivantes :

$$z(a) = t \left(w_0 + \sum_{i=1}^n w_i a_i \right) \quad \text{Eq. (2.15)}$$

Fonction de Heaviside : Aussi appelée fonction de seuil, elle permet d'activer le neurone lorsqu'une certaine valeur seuil $k \in \mathbb{R}$ est dépassée :

$$t(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < k \\ 1 & \text{si } x \geq k \end{cases} \quad \text{Eq. (2.16)}$$

La fonction de Heaviside est utilisée pour construire des réseaux de neurones à des fins de classification, car elle permet de faire un choix binaire « tout ou rien ».

Fonction Sigmoidale : C'est une fonction différentiable en forme de « S » qui met en place une sorte de seuil comme la fonction de Heaviside, mais de manière beaucoup moins brutale. Elle dépend d'un paramètre λ_s qui permet de fixer l'intensité de la variation à ce seuil :

$$t(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda_s x}} \quad \text{Eq. (2.17)}$$

D'autres fonctions au comportement similaire sont également utilisées.

Fonction linéaire : Elle revient à ne pas utiliser de fonction d'activation et à transmettre directement la somme pondérée des entrées en sortie du neurone :

$$t(x) = x \quad \text{Eq. (2.18)}$$

Un réseau de neurones qui serait basé uniquement sur cette fonction aurait une sortie totalement linéaire par rapport à ses entrées.

2.2.2.2.2 Réseau de neurones

Un réseau de neurones est une interconnexion de neurones artificiels répartis en différentes couches. La couche d'entrée peut être constituée d'une ou plusieurs variables d'entrée $x = (x_1, x_2, \dots, x_{n_x})$, et de même pour la couche de sortie $f(x) = (f_1(x), f_1(x), \dots, f_n(x))$. Les couches intermédiaires situées entre les couches d'entrée et de sortie sont appelées « couches cachées ». Chaque neurone N_i des couches cachées prend en entrée toutes les sorties des neurones de la couche précédente. La Figure 2.4 présente un exemple de réseau de neurones à une seule couche cachée.

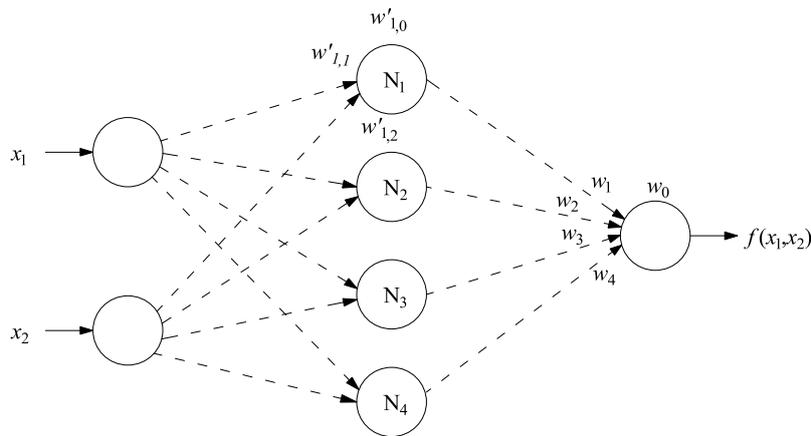


Figure 2.4. Réseau de neurones avec deux entrées, une couche cachée de quatre neurones et une sortie.

Régression : Toute fonction peut être approximée avec une précision arbitraire par un réseau de neurones à trois couches (c'est-à-dire avec une seule couche cachée) utilisant des fonctions d'activation sigmoïdes et une sortie linéaire [195]–[197]. Un réseau de neurones à une seule couche cachée est donc généralement utilisé pour construire un modèle de substitution de fonction. En notant n_n le nombre de neurones dans cette couche cachée, le modèle f s'écrit alors comme suit :

$$f(x) = w_0 + \sum_{i=1}^{n_n} w_i t \left(w'_{i0} + \sum_{j=1}^{n_x} w'_{ij} x_j \right) = w_0 + \sum_{i=1}^{n_n} w_i t \left(w'_{i0} + x^T w'_i \right) \quad \text{Eq. (2.19)}$$

Où $(w_0, w_1, \dots, w_{n_n}) \in \mathbb{R}^{n_n}$ représentent les poids des entrées du neurone de sortie et $w'_i = (w'_{i1}, w'_{i2}, \dots, w'_{i n_x}) \in \mathbb{R}^{n_x}$ les poids des entrées du neurone N_i de la couche cachée. La fonction t est une fonction sigmoïde.

L'approximation d'une fonction f par un réseau de neurones se fait en déterminant les $(1+n_n)$ ($1+n_x$) poids w , ainsi que le nombre n_n de neurones de sa couche cachée grâce aux échantillons d'apprentissage disponibles. L'apprentissage se fait en deux étapes : il faut d'abord être capable de trouver les coefficients optimaux du réseau pour un nombre fixe de neurones sur la couche

cachée, puis optimiser ce nombre de neurones cachés pour que le réseau représente au mieux la fonction à approximer.

Rétro-propagation : Un réseau de neurones est un modèle non interpolant pour lequel on cherche à minimiser l'erreur sur un ensemble de n_s échantillons d'apprentissage (s^i, u^i) de la fonction. Il faut donc résoudre un problème de moindres carrés visant à minimiser une fonction de coût globale c :

$$c(w) = \sum_{i=1}^{n_s} c^i(w) = \sum_{i=1}^{n_s} \|u^i - f(s^i)\|^2 \quad \text{Eq. (2.20)}$$

Où $w \in \mathbb{R}^{1+nm(1+nx)}$ représente l'ensemble des poids du réseau et c_i la fonction de coût associée à un échantillon unique (s^i, u^i) . Lorsque les fonctions d'activation t du réseau de neurones ne sont pas linéaires (comme dans le cas des fonctions sigmoïdes par exemple), un problème d'optimisation non linéaire se présente. Les fonctions sigmoïdes étant dérivables, il est possible de calculer analytiquement le gradient de c par rapport aux coefficients du modèle. La résolution du problème des moindres carrés peut donc se faire à l'aide de méthodes de descente itérative.

La principale technique utilisée dans l'apprentissage des réseaux neuronaux pour calculer le gradient de la fonction de coût c , est l'algorithme de rétro-propagation [198]. Son nom vient du fait qu'il vise à calculer ce gradient de manière récursive en partant de la sortie du réseau et en remontant vers les entrées. Lorsqu'un échantillon d'apprentissage s^i est présenté à l'entrée du réseau, sa valeur « réelle » u_i sur la fonction initiale peut être comparée à la valeur $f(s)$ calculée à la sortie par le réseau de neurones. Le gradient de cette erreur par rapport aux poids d'entrée du neurone de sortie peut alors être calculé. Le calcul des gradients par rapport aux poids des neurones de la couche cachée se fait ensuite à partir de l'erreur rétro-propagée provenant du neurone de sortie. L'erreur remonte ainsi à travers le réseau pour obtenir les gradients de c_i relativement à tous les poids w . Ces poids pourront alors être modifiés en fonction du gradient par la méthode d'optimisation retenue.

Selon les méthodes d'apprentissage, la mise à jour des poids du réseau se fait pour chaque nouvel échantillon à apprendre, ou une fois que tous les échantillons ont été présentés (les erreurs commises sur tous les échantillons sont alors cumulées avant de modifier les poids des neurones). En tout état de cause, les échantillons sont généralement pris en compte plusieurs fois afin d'atteindre une certaine convergence du réseau.

Nombre de neurones de la couche cachée : Le nombre de neurones dans la couche cachée n_n constitue un paramètre ayant un impact important sur les capacités de représentation du réseau. Son optimisation est donc souhaitable. Si ce nombre est trop faible, le réseau ne sera pas en mesure d'approximer correctement la fonction à modéliser. Dans le cas contraire, si n_n est trop grand, le nombre de coefficients du réseau sera important et il sera d'autant plus difficile de trouver les valeurs optimales de ces coefficients à partir du nombre limité d'échantillons d'apprentissage disponibles. Ceci explique l'importance de choisir un nombre de neurones cachés adapté à la fonction à représenter.

Plusieurs stratégies existent pour déterminer le nombre optimal de neurones dans la couche cachée. La première consiste à construire plusieurs réseaux avec des nombres de neurones différents pour ne garder au final que le meilleur. La seconde consiste à construire successivement des réseaux de neurones avec de plus en plus de neurones, en arrêtant d'ajouter des neurones dans la couche cachée lorsque l'erreur commise par le modèle ne diminue plus, ou au contraire de partir d'un réseau avec un grand nombre de neurones et d'en enlever un à chaque itération (mais il y aura plus de coefficients à optimiser).

2.2.2.3 Krigeage

Le Krigeage (ou « Kriging » en anglais) doit son nom à son auteur D. G. Krige [199]. Il s'agit d'une technique issue à l'origine de l'analyse minière et de la géostatistique [200] qui est aujourd'hui l'une des méthodes les plus populaires pour la construction de modèles de substitution. Au même titre que les réseaux de neurones, les modèles de Krigeage permettent d'approximer des fonctions complexes à partir de la connaissance de seulement quelques échantillons. Le Krigeage estime la valeur d'une fonction f en un point donné par une combinaison linéaire de plusieurs échantillons d'apprentissage. Le poids associé à chaque échantillon dépend de la distance au point considéré, étant supposé que les points proches dans l'espace aient tendance à avoir des caractéristiques similaires (l'échantillon le plus proche recevra donc le poids le plus élevé). Le Krigeage présente l'avantage de fournir une estimation en tout point de l'erreur de prédiction de la valeur de la fonction f .

Le Krigeage considère que la fonction $f: \mathbb{R}^{n_x} \rightarrow \mathbb{R}$ à modéliser est une réalisation d'un processus stochastique gaussien F composé d'une partie déterministe μ et d'une partie aléatoire ε :

$$F(x) = \mu(x) + \varepsilon(x) \quad \text{Eq. (2.21)}$$

Avec $x \in \mathbb{R}^{n_x}$, μ représente la tendance moyenne du processus, et ε est un processus gaussien stationnaire d'espérance nulle ($E[\varepsilon(x)] = 0$), de variance $V_k^2 \in \mathbb{R}$ et de covariance :

$$\text{Cov}(\varepsilon(x), \varepsilon(x')) = V_K^2 R(x, x') \quad \text{Eq. (2.22)}$$

La particularité de cette covariance est que R est une fonction de corrélation telle que la corrélation entre deux points ne dépend que de leur distance. Elle se présente sous la forme :

$$R(x, x') = \prod_{i=1}^{n_x} R_i(|x_i - x'_i|) \quad \text{Eq. (2.23)}$$

Avec $x = (x_1, x_2, \dots, x_{n_x}) \in \mathbb{R}^{n_x}$ et $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{n_x}) \in \mathbb{R}^{n_x}$.

L'établissement d'un modèle de Krigeage revient donc à approximer le processus stochastique F par un processus \hat{F} . La modélisation mathématique détaillée de ce modèle est bien décrite par Baudouin [133].

Types de krigeage : Plusieurs types de Krigeage existent selon la forme donnée à $\mu(x)$. Les principaux types sont les suivants (allant du plus simple au plus général) :

- ✓ Krigeage simple $\mu(x)$ est une constante connue : $\mu(x) = 0$ par exemple ;
- ✓ Krigeage ordinaire $\mu(x)$ est une constante inconnue : $\mu(x) = \mu \in \mathbb{R}$;
- ✓ Krigeage universel $\mu(x)$ est une combinaison linéaire de n fonctions t_i connues, pondérées par des coefficients $\beta_i \in \mathbb{R}$ à déterminer : $\mu(x) = \sum_{i=1}^n \beta_i t_i(x)$ (on choisit généralement une base de fonctions t_i polynomiales).

Le Krigeage le plus général est en effet le Krigeage universel, qui consiste par principe à effectuer concrètement une première régression grossière à partir des échantillons d'apprentissage grâce à la fonction μ , puis à affiner le modèle via le second terme ε . Bien que certains préfèrent utiliser ce type de Krigeage, d'autres soutiennent qu'il est tout aussi correct d'utiliser une fonction μ plus simple et de laisser ε approcher au mieux la fonction. Le Krigeage universel serait plus approprié dans les cas où les données ont une tendance générale qui peut être modélisée par une fonction simple (comme un polynôme). En pratique, les deux approches permettent d'obtenir des résultats satisfaisants.

2.2.2.2.4 Autres modèles de substitution

Nous avons présenté ci-dessus trois des principaux types de modèles de substitution utilisés dans la littérature pour représenter des fonctions à partir d'un ensemble d'échantillons d'apprentissage. Il en existe bien sûr de nombreux autres, parmi lesquels on peut citer le RBF (« Radial Basis Function Network » [201]), le SVM (« Support Vector Machines » [202]), le

MLS (« Moving Least Squares » [203]) ou les modèles basés sur des splines (MARS, « Multivariate Adaptive Regression Splines » [204]). Il existe également des modèles dont les fonctions de base ne sont pas fixées a priori, ce qui est l'inverse des modèles décrits ci-dessus. Ce type de modèle est étudié dans le cadre de la régression symbolique. Ces modèles ont démontré leurs performances en termes d'approximation de fonctions, mais ne sont pas aussi couramment utilisés que les trois types présentés ci-dessus.

2.2.2.2.5 Erreur d'un modèle de substitution

Un modèle de substitution est une approximation d'une fonction construite à partir d'un certain nombre d'échantillons d'apprentissage. Lorsqu'on utilise un tel modèle, il est important de garder à l'esprit que les valeurs qu'il fournit ne sont que des estimations des valeurs réelles de cette fonction de référence. Il est donc intéressant de pouvoir estimer l'erreur de prédiction d'un modèle. Quel que soit le type de modèle utilisé, cette estimation n'est pas aisée car l'erreur d'un modèle est liée par définition à la valeur réelle de la fonction que l'on modélise. Or, cette fonction n'est connue uniquement qu'en un nombre limité de points. Il est donc impossible de connaître l'erreur réelle d'un modèle en tout point, mais on peut par contre faire des estimations à partir des données dont on dispose.

Il existe de multiples raisons et méthodes pour estimer l'erreur d'un modèle. D'abord, le désir de construire un modèle de substitution avec l'erreur la plus faible possible : cette erreur peut être vérifiée lors de l'établissement du modèle par des techniques de « validation ». Ensuite, une fois le modèle construit, il sera possible d'estimer son erreur globale afin d'avoir une idée sur sa qualité.

2.2.2.2.5.1 Contrôle de l'erreur

Les paramètres d'un modèle de substitution doivent être optimisés afin d'approcher au mieux les échantillons de la fonction qui lui sont fournis. Lors de la mise en place d'un modèle, il est possible d'évaluer son erreur d'apprentissage en comparant les valeurs prédites de ces échantillons avec leurs valeurs réelles. Cette erreur est naturellement nulle dans le cas d'un modèle interpolant, mais pour un modèle régressif, elle diminue généralement au fur et à mesure des itérations d'apprentissage.

Lorsque l'erreur d'apprentissage devient trop faible, on peut être confronté à un phénomène de « sur-apprentissage ». Ce phénomène correspond à l'obtention d'un modèle qui s'approche très près des échantillons d'apprentissage mais qui a perdu toute capacité de généralisation à des prédictions en dehors de ces points. Par exemple, on peut avoir un modèle qui oscille

significativement pour traverser précisément chaque échantillon d'apprentissage, alors que la fonction de référence est elle-même relativement lisse. Ce phénomène est d'autant plus problématique lorsque les données d'apprentissage sont bruitées, car on cherche alors à approcher les échantillons d'apprentissage sans pour autant les prédire précisément. La considération unique de l'erreur d'apprentissage n'est donc pas suffisante pour obtenir un modèle de qualité. Lors de la construction de modèles régressifs, il est possible de contrôler leur erreur de généralisation pour éviter le sur-apprentissage et ce, grâce à certaines techniques de validation (voir [205]).

Validation : L'erreur d'un modèle peut être estimée pendant le processus d'apprentissage grâce à des échantillons appelés « de validation ». Il s'agit d'échantillons de la fonction de référence qui sont utilisés pour déterminer la qualité du modèle à chaque itération. Ces échantillons sont issus de la base d'apprentissage fournie au départ pour construire le modèle : l'apprentissage est donc réalisé sur un nombre plus restreint d'échantillons.

Pendant l'optimisation des coefficients du modèle avec une base d'apprentissage réduite, une erreur moyenne sur la base de validation est évaluée en comparant les valeurs prédites aux valeurs réelles en ces points. Tant que l'erreur de validation diminue, on continue à faire des itérations d'apprentissage pour améliorer le modèle. En revanche, lorsque cette erreur augmente, cela signifie que la capacité de généralisation du modèle commence à se détériorer, et nous pouvons donc arrêter l'apprentissage. Le sur-apprentissage se produit lorsque l'erreur de la base d'apprentissage diminue (le modèle devient plus précis par rapport aux échantillons d'entraînement) mais l'erreur de validation se détériore (le modèle perd sa capacité à s'approcher des zones absentes de la base d'apprentissage). L'utilisation d'échantillons de validation permet donc de contrôler l'évolution du processus d'apprentissage et d'arrêter le processus au moment approprié.

Le nombre d'échantillons de validation utilisés est généralement fixé en fonction du nombre total d'échantillons d'apprentissage disponibles (typiquement 20% des échantillons sont prélevés). Ils sont généralement choisis de manière aléatoire à partir de la base d'apprentissage initiale, mais il est également possible de prévoir des méthodes de sélection plus avancées afin de limiter la distorsion dans l'estimation de l'erreur du modèle (en garantissant, par exemple, une bonne distribution des échantillons de validation dans l'espace d'entrée).

Validation croisée : En présence d'un nombre limité d'échantillons disponibles pour la construction du modèle, il peut être préjudiciable de devoir en séparer un certain nombre à des fins de validation. Dans ce cas, il est possible d'utiliser une stratégie de validation croisée [206].

La validation croisée est basée sur le principe de validation présenté ci-dessus, mais appliqué de manière répétée avec différentes bases de points. L'ensemble des échantillons d'apprentissage disponibles est donc séparé en différents groupes. A son tour, chacun de ces groupes est utilisé comme une base de validation lors de la construction d'un modèle qui prend comme base d'apprentissage l'ensemble des échantillons des groupes restants. Au final, on obtient autant de modèles que de groupes d'échantillons. Chacun de ces modèles représente une approximation de la fonction de référence, basée sur des données d'apprentissage partiellement distinctes les unes des autres. Ces modèles peuvent ensuite être agrégés afin de rassembler toutes les informations apprises, en considérant par exemple la valeur moyenne des sorties des modèles pour la prédiction d'un point.

La validation croisée, bien que coûteuse puisqu'elle nécessite la construction d'un nombre plus important de modèles, permet de prendre en compte l'ensemble des échantillons d'apprentissage disponibles tout en veillant à éviter le sur-apprentissage (car l'erreur de généralisation est contrôlée lors de la construction de chaque modèle). On utilise typiquement cinq groupes d'échantillons, ce qui représente une base de 20% des échantillons de validation pour chaque modèle. Là encore, des techniques avancées de regroupement peuvent être mises en place.

Les techniques de validation et de validation croisée nous permettent d'établir des modèles de substitution ayant de bonnes capacités de généralisation, grâce à la mise en place d'un contrôle d'erreur lors du processus d'apprentissage. Elles peuvent être appliquées à tout type de modèle.

2.2.2.5.2 Estimation de l'erreur

L'erreur d'un modèle de substitution peut être appréciée globalement pour déterminer sa qualité générale d'approximation, ou plus localement pour connaître la précision du modèle en un point donné. En général, l'évaluation des modèles de substitution est réalisée à travers l'analyse de quelques indicateurs, mesurant ainsi les erreurs générées lors de la phase d'apprentissage. Ces erreurs peuvent prendre différentes formes, dont les principales qui existent dans la littérature sont présentées ci-dessous.

Notez que dans les formules suivantes, \hat{y}_i est la $i^{\text{ème}}$ valeur prédite, et y_i est la $i^{\text{ème}}$ valeur de référence. Les modèles de substitution prédisent l'élément \hat{y}_i pour l'élément y_i correspondant à la base de données initiale.

Moyenne des valeurs de référence :

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \quad \text{Eq. (2.24)}$$

Avec, \bar{y} est la moyenne des valeurs de référence, m est le nombre d'observations.

Moyenne de la somme totale des carrés (MST) :

$$MST = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Eq. (2.25)}$$

Coefficient de détermination :

Le coefficient de détermination R^2 [207] peut être interprété comme étant la proportion de la variance de la variable dépendante qui est prévisible à partir des variables indépendantes (pire valeur = -∞ ; meilleure valeur = +1).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Eq. (2.26)}$$

Erreur quadratique moyenne :

Le MSE peut être utilisé lorsqu'il est nécessaire de détecter des valeurs aberrantes. En effet, le MSE permet d'attribuer un poids plus important à de tels points, grâce à la norme L_2 : de toute évidence, si le modèle finit par produire une seule prédiction très mauvaise, l'élévation au carré de la fonction amplifie l'erreur (meilleure valeur = 0 ; pire valeur = +∞).

Étant donné que $R^2 = 1 - \frac{MSE}{MST}$ et que MST est fixé pour les données considérées, R^2 est lié de façon monotone à MSE (une relation monotone négative), ce qui implique qu'un ordre de classement des modèles de régression basé sur R^2 sera identique (bien qu'en ordre inverse) à un ordre de classement des modèles basé sur MSE ou RMSE.

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{Eq. (2.27)}$$

Racine de l'erreur quadratique moyenne :

Les deux quantités MSE et RMSE sont liées de façon monotone (par la racine carrée). Un classement des modèles de régression basé sur MSE sera identique à un classement des modèles basé sur RMSE (meilleure valeur = 0 ; pire valeur = +∞).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{Eq. (2.28)}$$

Erreur absolue moyenne :

La MAE peut être utilisée lorsque les valeurs aberrantes représentent des parties corrompues des données. En effet, MAE ne pénalise pas trop les valeurs aberrantes lors de l'apprentissage (la norme L_1 lisse en quelque sorte toutes les erreurs des éventuelles valeurs aberrantes), fournissant ainsi une mesure de performance générique et limitée pour le modèle. D'autre part, si l'ensemble de test comporte également de nombreuses valeurs aberrantes, la performance du modèle sera médiocre (meilleure valeur = 0 ; pire valeur = $+\infty$).

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i - \hat{y}_i| \quad \text{Eq. (2.29)}$$

Pourcentage d'erreur absolue moyenne :

Le MAPE est une autre mesure de performance pour les modèles de régression, ayant une interprétation très intuitive en termes d'erreur relative : en raison de sa définition, son utilisation est recommandée dans les tâches où il est plus important d'être sensible aux variations relatives qu'aux erreurs absolues [208]. Cependant, il présente également un certain nombre d'inconvénients, dont les plus importants sont la restriction de son utilisation à des données strictement positives par définition et le fait qu'il soit biaisé en faveur des prévisions faibles. Cela le rend inadapté aux modèles prédictifs pour lesquels de grandes erreurs sont attendues [209] (meilleure valeur = 0 ; pire valeur = $+\infty$).

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad \text{Eq. (2.30)}$$

Pourcentage d'erreur absolue moyenne symétrique :

Initialement défini par Armstrong [210], puis affiné dans sa version actuelle par Flores [211] et Makridakis [212], le SMAPE a été proposé pour remédier aux inconvénients de la métrique MAPE. Cependant, il existe peu de consensus sur une formule définitive pour le SMAPE, et différents auteurs continuent d'utiliser des versions légèrement différentes [213]. La formule originale de la SMAPE définit la valeur maximale comme étant de 200%, ce qui équivaut à 2 en termes de calcul (meilleure valeur = 0 ; pire valeur = 2).

$$SMAPE = \frac{100\%}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{(|y_i| + |\hat{y}_i|)/2} \quad \text{Eq. (2.31)}$$

Les indicateurs RMSE, MAE, MSE et SMAPE possèdent la valeur 0, si le modèle de régression linéaire correspond parfaitement aux observations, et une valeur positive si le modèle ne correspond pas parfaitement aux observations. En outre, le coefficient de détermination a la valeur 1 si le modèle de régression linéaire s'adapte parfaitement aux données (c'est-à-dire, si $MSE = 0$), la valeur 0 si $MSE = MST$, et la valeur négative si le MSE est supérieur au MST.

Bien qu'il ne soit pas nécessaire de creuser les propriétés mathématiques des indicateurs statistiques susmentionnés, il est clair qu'il est difficile d'interpréter les valeurs uniques de MSE, RMSE, MAE et MAPE, car elles ont $+\infty$ comme limite supérieure. Un $MSE = 0.7$, par exemple, ne dit pas grand-chose sur la qualité globale d'un modèle de régression : cette valeur peut signifier aussi bien un excellent modèle de régression qu'un mauvais modèle de régression. Nous ne pouvons le savoir que si la valeur MSE maximale pour la tâche de régression est fournie ou si la distribution de toutes les valeurs de référence est connue. Le même concept est valable pour les autres indicateurs ayant $+\infty$ comme limite supérieure, tels que RMSE, MAE et MAPE.

Les deux seuls scores de régression qui ont des valeurs réelles strictes sont le R_2 non négatif et le SMAPE. Le R_2 peut avoir des valeurs négatives, ce qui signifie que la régression a donné de mauvais résultats. Le R_2 peut avoir la valeur 0, lorsque le modèle de régression n'explique en rien la variabilité des données de réponse autour de leur moyenne [214].

Les valeurs positives du coefficient de détermination se situent dans l'intervalle $[0, 1]$, avec 1 signifiant une prédiction parfaite. D'autre part, les valeurs de SMAPE se situent dans l'intervalle $[0, 2]$, 0 signifiant une prédiction parfaite et 2 la pire prédiction possible.

C'est le principal avantage du coefficient de détermination et du SMAPE par rapport au RMSE, MSE, MAE et MAPE : des valeurs telles que $R_2 = 0.8$ et $SMAPE = 0.1$, par exemple, indiquent clairement une très bonne performance du modèle de régression, quelles que soient les plages des valeurs de référence et leurs distributions. Une valeur de RMSE, MSE, MAE ou MAPE égale à 0.7, par contre, ne nous renseigne pas sur la qualité de la régression effectuée.

Bien que le SMAPE offre un jugement particulièrement précis pour évaluer le modèle de régression puisqu'il possède un intervalle de confiance très réduit (Soit $[0, 2]$), une combinaison

de RMSE, MSE, MAE ou MAPE avec le R_2 , est également appréciée et donc suffisante pour évaluer le degré de précision du modèle de régression.

2.2.2.2.6 Discussion

Il existe de nombreux modèles de substitution distincts. Dans ce rapport, nous avons décrit les trois types de modèles de substitution les plus répandus aujourd'hui : les approximations polynomiales, les réseaux de neurones et le Krigeage. Chacun a ses avantages et ses faiblesses, qu'il est important de connaître afin de pouvoir sélectionner un modèle adapté à la problématique abordée.

Plusieurs études comparatives concernant les différents types de modèles de substitution ont été publiées. Citons notamment [215] qui compare les approximations polynomiales et les réseaux de neurones, [216] qui étudie les approximations polynomiales et le Krigeage, ou encore [217] qui compare les trois modèles. [218] présente également une étude assez complète comparant plusieurs types de modèles, y compris les polynômes et le Krigeage, sur une large gamme de fonctions à approximer. Ces fonctions présentent diverses caractéristiques qui peuvent être confrontées à des cas réels : des fonctions dont la dimension d'entrée est plus ou moins importante, des fonctions fortement non linéaires ou plus lisses, des fonctions déterministes ou bruitées, etc. Il est également possible d'avoir accès à un nombre plus ou moins important d'échantillons de ces fonctions pour construire les modèles.

Ces études montrent que les approximations polynomiales sont les modèles les mieux maîtrisés et les plus simples à mettre en œuvre. Elles fournissent une expression analytique simple à comprendre, dont l'importance de chacune des variables d'entrée est clairement mise en évidence. Toutefois, elles sont plutôt limitées à l'approximation de fonctions en dimension réduite, car le nombre d'échantillons d'apprentissage nécessaires pour établir un modèle de bonne qualité croît très rapidement avec la dimension de l'espace. Le nombre d'échantillons est également affecté par l'ordre du polynôme utilisé, et il est donc nécessaire de se restreindre à des fonctions relativement lisses ou à des représentations localisées afin de bénéficier d'un degré de non-linéarité moins important.

Les réseaux de neurones et le Krigeage permettent d'obtenir de bonnes représentations globales de fonctions non linéaires, au prix d'une mise en œuvre plus délicate. La construction des réseaux de neurones est généralement plus coûteuse que celle des modèles de Krigeage, mais ils sont bien adaptés aux espaces de grande dimension car leur complexité n'est limitée que par le nombre de neurones. Au contraire, la complexité d'un modèle de Krigeage augmente avec le

nombre d'échantillons d'apprentissage : ce type de modèle sera donc plus approprié pour des problèmes de dimension raisonnable et qui nécessitent un nombre plus faible d'échantillons. Toutefois, diverses améliorations existent pour chacun des trois modèles afin de pallier les inconvénients que nous venons de présenter.

En conclusion, on peut dire que ces différents modèles de substitution sont aujourd'hui largement utilisés et fonctionnent relativement bien. L'utilisation d'un type de modèle ou d'un autre dépendra de ses propres qualités par rapport à la nature des applications traitées, mais aussi de la maîtrise que l'on en a. Dans ce rapport, ce sont les réseaux de neurones qui ont été choisis comme étant un type de modèle de substitution pour l'approche proposée. Dans la mesure où ils sont les plus répandus dans le sujet de l'optimisation des performances des bâtiments, comme le montre l'Annexe 4.

2.2.3 Optimisation

2.2.3.1 Généralité

L'optimisation est une branche des mathématiques, au sens large, et en particulier de l'aide à la décision dans le domaine de l'ingénierie. Le but est de modéliser, d'analyser et de résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser une ou plusieurs fonctions sur un ensemble.

Dans un problème mono objectif, il existe une seule fonction objectif bien définie pour laquelle le système est amené à évoluer dans une certaine direction afin de parvenir à une solution optimale unique. Cependant, dans certains cas, l'utilisation d'une fonction objectif unique ne permet pas de saisir tous les points de vue ou capacités d'un système, ce qui peut conduire à étendre le problème d'optimisation au cadre multi-objectif.

En effet, dans la plupart des problèmes de conception, plusieurs objectifs doivent être optimisés simultanément pour atteindre une solution satisfaisante. Le caractère multi-objectif du problème est donné par l'existence d'objectifs contradictoires signifiant que l'amélioration d'un objectif implique la détérioration d'un autre. Ce conflit entre les objectifs est souvent rencontré lorsqu'on cherche à obtenir les meilleures performances possibles pour un faible coût. En effet, plus une structure est complexe et performante, plus son coût sera élevé. L'optimisation multi-objectif consiste alors à rechercher l'ensemble des solutions qui correspondent aux meilleurs compromis entre les objectifs de sécurité à maximiser et de coût à minimiser.

Un problème d'optimisation multi-objectif est caractérisé par un ensemble de fonctions objectif à maximiser ou à minimiser et par un certain nombre de contraintes de conception à satisfaire.

Contrairement au cas à objectif unique pour lequel une seule fonction objectif doit être optimisée, l'optimisation multi-objectif consiste à trouver les meilleurs compromis entre différents objectifs conflictuels. Les problèmes d'optimisation multi-objectifs peuvent être formulés mathématiquement comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiser / Minimiser } f_m(\vec{x}), \quad m = 1, 2, \dots, M \\ \text{Soumis à } g_j(\vec{x}) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \\ \text{et à } h_k(\vec{x}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \\ \text{avec } \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \in X^n \end{array} \right. \quad \text{Eq. (2.32)}$$

Le vecteur de conception \vec{x} regroupe les n variables de conception utilisées pour évaluer les fonctions objectif et les contraintes du problème. Les variables de conception sont en effet les variables qui seront ajustées tout au long du processus d'optimisation pour la recherche des meilleurs compromis possibles au regard des objectifs. Elles sont définies dans l'espace de conception X^n de dimension égale au nombre de variables de conception considérées. Chaque dimension i de l'espace de conception est définie par une limite inférieure X_i^{inf} et par une limite supérieure x_i^{sup} , telle que $x_i^{inf} \leq x_i \leq x_i^{sup}$.

Le vecteur objectif $f(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), \dots, f_m(\vec{x}), \dots, f_M(\vec{x}))$ est défini par l'ensemble des fonctions objectif considérés dans le problème d'optimisation. Une fonction objectif représente un objectif à atteindre et résulte d'un besoin ou d'une préférence exprimée par le décideur. Les fonctions objectif sont définis dans l'espace des objectifs, également appelé espace image de l'espace de conception, de dimension équivalente au nombre de fonctions objectif considérées et délimitées par les valeurs extrêmes susceptibles d'être prises par ces dernières. Étant donné que les fonctions objectif sont exprimées en fonction des variables de conception, chaque configuration de conception conduit a priori à un ensemble différent de fonctions objectif. Les alternatives peuvent donc être différenciées non seulement dans l'espace de conception mais aussi dans l'espace des objectifs. Chacune des m fonctions objectif est soit à maximiser, soit à minimiser, dont le but est de rechercher les vecteurs de conception pour lesquels les meilleurs compromis sur les M objectifs sont obtenus. Selon le principe de dualité, une fonction objectif à minimiser peut être réduite à un problème de maximisation en la multipliant par -1.

Les fonctions $g_j(\vec{x})$ et $h_k(\vec{x})$ correspondent aux fonctions contraintes du problème et impliquent une restriction dans l'espace de conception. Les fonctions contraintes, exprimées sous forme d'égalité ou d'inégalité, permettent de distinguer le domaine réalisable du domaine

non réalisable en fonction du fait que les contraintes sont remplies ou non. Un ensemble de variables de conception défini dans le domaine réalisable X_f^n de l'espace X^n pour lequel l'ensemble des contraintes d'inégalité et d'égalité sont satisfaites tel que :

$$X_f^n = \{ \vec{x} \in X^n \mid g(\vec{x}) \geq 0 \wedge h(\vec{x}) = 0 \} \quad \text{Eq. (2.33)}$$

Suite à l'équation, les contraintes d'égalité sont exprimées sous la forme normalisée $h(\vec{x}) = 0$ et les contraintes d'inégalité sont formalisées de telle sorte qu'elles sont satisfaites lorsque $g(\vec{x}) \geq 0$.

Une contrainte d'égalité est dite active s'il existe au moins deux points dans l'espace de conception pour lesquels l'égalité est respectivement vérifiée et non vérifiée. Elle est dite inactive si elle est vérifiée en tous points de l'espace de conception et dite violée si l'égalité n'est pas satisfaite en tous points de l'espace ($h(\vec{x}) \neq 0$). De même, une contrainte d'inégalité est dite active s'il existe un point dans l'espace de conception pour lequel on atteint l'état limite $g(\vec{x}) = 0$. Elle est dite inactive ou violée si on obtient respectivement, pour tous les points de l'espace de conception, $g(\vec{x}) > 0$ ou $g(\vec{x}) < 0$.

En présence d'une contrainte violée, le domaine réalisable est considéré comme étant vide et implique une reformulation du problème d'optimisation en retirant la contrainte violée ou en redéfinissant une ou plusieurs contraintes plus flexibles. À l'inverse, une contrainte inactive ne contraint pas l'espace de conception et ne contribue donc pas au choix d'une solution. En ce sens, seules les contraintes actives doivent être considérées pour garantir la faisabilité d'une solution et assurer l'efficacité de l'algorithme d'optimisation.

En général, un problème d'optimisation multi-objectif se compose de deux étapes. La première étape est la recherche d'un ensemble de solutions techniques potentielles via des algorithmes d'optimisation. Ensuite, la génération de la meilleure solution est effectuée via une approche de résolution. Ces deux étapes peuvent être dissociées ou associées en fonction de l'algorithme de calcul considéré.

En optimisation et aide à la décision, plusieurs méthodes de résolution d'un problème d'optimisation sont présentes dans la littérature. Ces méthodes peuvent être issues de la famille des approches de résolution : méthodes agrégées, non-agrégées, interactives, etc., ou de la famille des algorithmes : méthodes exactes, déterministes, métaheuristiques, etc., et de la famille hybride qui se distingue en fonction des méthodes combinées. Dans ce rapport de thèse,

nous nous concentrons uniquement sur la famille des algorithmes d'optimisation, dans la mesure où ils représentent les méthodes les plus pertinentes pour le problème d'optimisation étudié.

2.2.3.2 Algorithmes d'optimisation

Dans la littérature, il existe plusieurs approches de résolution multi-critères [219]. Collette et Siarry [220] ont classé ces méthodes en fonction du type de problème. Dans le cas d'un problème combinatoire, des méthodes heuristiques spécialisées, des Métaheuristiques et des méthodes exactes spécialisées peuvent être utilisées. Alors que dans le cas du problème continu, outre les Métaheuristiques, il y a des méthodes déterministes, des méthodes locales et de la programmation linéaire.

2.2.3.2.1 Méthodes exactes

Les méthodes exactes (également appelées complètes) produisent une solution optimale pour une instance de problème d'optimisation donnée. Elles sont généralement basées sur la recherche d'arbres et l'énumération partielle de l'espace des solutions.

Elles sont utilisées pour trouver au moins une solution optimale à un problème donné. Les techniques exactes les plus connues sont la méthode de séparation et évaluation (branch-and-bound), la programmation dynamique et la programmation linéaire.

Le principe de base de ces méthodes consiste à évaluer les fonctions objectif en chaque point de l'espace de solution jusqu'à l'obtention de l'optimum global. Par exemple, la méthode « Branch and Bound » est basée sur le processus suivant :

- ✓ Diviser l'espace de recherche en sous-espaces ;
- ✓ Trouver une limite minimale en termes de fonction objectif associée à chaque sous-espace de recherche ;
- ✓ Éliminer les "mauvais" sous-espaces ;
- ✓ Répéter les étapes précédentes jusqu'à l'obtention de l'optimum global.

Le principal inconvénient de ces méthodes est l'explosion combinatoire : le nombre de combinaisons augmente avec la dimension du problème. L'efficacité de ces algorithmes n'est donc prometteuse que pour des problèmes de petite taille.

2.2.3.2.2 Méthodes déterministes

Dans le cas de problèmes continus, l'utilisation de méthodes d'optimisation déterministes est la plus conventionnelle. Ces méthodes sont caractérisées par une exploration systématique de l'espace de recherche. Il s'agit d'une méthode de recherche séquentielle de l'optimum d'un

problème d'optimisation. La continuité et la dérivabilité des fonctions objectif sont obligatoires dans ce cas. L'optimisation par les méthodes déterministes peut être directe en exploitant les fonctions objectif (par exemple l'algorithme du simplexe) ou indirecte en utilisant les gradients de ces dernières.

2.2.3.2.2.1 Méthode du simplexe Nelder Mead

La méthode du simplexe Nelder-Mead [221], la plus populaire des méthodes déterministes directes, ne doit pas être confondue avec la méthode du simplexe en programmation linéaire. Il s'agit d'une méthode facile à utiliser pour trouver de manière séquentielle l'optimum d'un problème d'optimisation. Elle ne nécessite aucune information sur la dérivée de la fonction considérée.

Le principe de cette méthode est d'utiliser $(n+1)$ points de l'espace de recherche, où n est le nombre de paramètres du problème, afin de définir une direction d'amélioration des fonctions objectif. Un calcul itératif est effectué en éliminant à chaque fois le plus mauvais point à partir duquel la génération d'un nouveau point est effectuée. Il est à noter que les points éliminés ne doivent pas être réutilisés, ce qui évite de converger vers des points moins efficaces. Le simplexe est amélioré par quatre transformations à savoir la réflexion et le rétrécissement proposés par Spendley et al. [222] pour changer la taille du simplexe. L'expansion et la contraction sont proposées par Nelder et Mead [221] pour le changement de sa taille. Ces transformations sont appliquées jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Le principal avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite aucune information sur la dérivée de la fonction considérée. Par contre, une attention particulière doit être portée au choix du point de départ. De plus, la convergence vers un optimum local est très probable. Enfin, la recherche d'une surface de compromis nécessite un calcul itératif à partir de différents points initiaux.

2.2.3.2.2.2 Méthodes de gradient

Les méthodes d'analyse par gradient, comme leur nom l'indique, utilisent le gradient d'une fonction objectif pour trouver l'optimum. Dans ce cas, cette fonction doit être dérivable. Les étapes du calcul sont les suivantes :

- ✓ Définir un point de départ x_0 ;
- ✓ Calculer le gradient de la fonction objectif $\nabla f(x_0)$;
- ✓ Déterminer la longueur du pas de minimisation $\lambda^k = \operatorname{argmin}(f(x_k) - \lambda \nabla f(x^k))$;

- ✓ Calcul itératif jusqu'à ce que le critère de convergence soit satisfait par la formule :

$$x^{k+1} = x^k - \lambda^k \frac{\nabla f(x^k)}{\|\nabla f(x^k)\|} \quad \text{Eq. (2.34)}$$

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

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

2.2.3.2.3 Métaheuristiques stochastiques

Le mot métaheuristique est composé de deux mots grecs : « méta » et « heuristique ». Le mot « méta » est un suffixe signifiant *au-delà*, c'est-à-dire de *niveau supérieur*. Tandis que le mot « heuristique » fait référence à une méthode de calcul qui fournit rapidement une solution réalisable, pas nécessairement optimale ou exacte, à un problème d'optimisation difficile.

Lorsque les méthodes présentées ci-dessus sont inefficaces, par exemple pour un problème purement discret, les méthodes métaheuristiques peuvent alors être la solution à utiliser. Contrairement aux méthodes heuristiques, ces méthodes sont généralement inspirées de la nature, et s'appliquent donc à plusieurs problèmes de nature différente. Pour cette raison, on peut dire qu'il s'agit de méthodes heuristiques modernes, de niveau supérieur, dédiées particulièrement à la résolution de problèmes d'optimisation. Leur but est d'atteindre un optimum global tout en échappant aux optima locaux.

Les métaheuristiques regroupent des méthodes qui peuvent être divisées en deux catégories :

Métaheuristiques à solution unique : Ces méthodes ne traitent qu'une seule solution à la fois, afin de trouver la solution optimale.

Métaheuristiques à population de solutions : Ces méthodes utilisent une population de solutions à chaque itération jusqu'à l'obtention de la solution globale.

Ces méthodes présentent des caractéristiques communes :

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

Ces méthodes présentent également les mêmes inconvénients, notamment la difficulté du paramétrage des algorithmes. En effet, il faut tester plusieurs configurations pour connaître le degré d'évolution de la surface de compromis. Le temps de calcul est également élevé. De plus, les théorèmes de convergence sont généralement inexistant.

2.2.3.2.3.1 Notions de dominance et d'optimalité au sens de Pareto

Le concept d'utilisation de la dominance de Pareto a été proposé par Goldberg [223] pour résoudre les problèmes proposés par Schaffer [224]. Il suggère d'utiliser le concept d'optimalité de Pareto pour respecter la complétude de chaque critère dans la mesure où il évite de comparer a priori les valeurs de différents critères. L'utilisation d'une sélection basée sur le concept de dominance de Pareto fait converger la population vers un ensemble de solutions efficaces. Ce concept ne permet pas de choisir une alternative plutôt qu'une autre, mais il apporte une aide précieuse au décideur.

2.2.3.2.3.1.1 Optimum de Pareto

Au 19^{ème} siècle, Vilfredo Pareto, un mathématicien italien, a formulé le concept suivant [225]: dans un problème multi-objectif, il existe un équilibre tel qu'un critère ne peut être amélioré sans détériorer au moins un des autres critères.

Cet équilibre a été appelé Pareto-optimal. Un point x est dit Pareto-optimal s'il n'est dominé par aucun autre point appartenant au même ensemble. Ces points sont également appelés solutions *non inférieures* ou *non dominées*.

2.2.3.2.3.1.2 Notion de dominance

Les algorithmes d'optimisation basés sur Pareto (1896) utilisent les notions de dominance pour comparer les alternatives deux-à-deux. Une solution potentielle A , définie par un vecteur de conception \vec{x}^A , domine l'alternative B définie par \vec{x}^B si et seulement si les conditions suivantes sont remplies (dans un contexte de minimisation) :

$$\begin{cases} \forall m \in \{1, \dots, M\}, f_m(\vec{x}^A) \leq f_m(\vec{x}^B) \\ \exists m \in \{1, \dots, M\}, f_m(\vec{x}^A) < f_m(\vec{x}^B) \end{cases} \Rightarrow A < B \quad \text{Eq. (2.35)}$$

On dit que A domine strictement B si et seulement si :

$$\forall m \in \{1, \dots, M\}, f_m(\vec{x}^A) < f_m(\vec{x}^B) \Rightarrow A \ll B \quad \text{Eq. (2.36)}$$

On dit que A domine faiblement B si et seulement si :

$$\forall m \in \{1, \dots, M\}, f_m(\vec{x}^A) \leq f_m(\vec{x}^B) \Rightarrow A \leq B \quad \text{Eq. (2.37)}$$

On dit que A est équivalent (ou indifférent) à B si et seulement si :

$$\forall m \in \{1, \dots, M\}, f_m(\vec{x}^A) \not\leq f_m(\vec{x}^B) \wedge f_m(\vec{x}^B) \not\leq f_m(\vec{x}^A) \Rightarrow A \sim B \quad \text{Eq. (2.38)}$$

La Figure 2.5 montre un exemple de dominance, où les points 1, 3 et 5 ne sont dominés par aucun des points. Alors que le point 2 est dominé par le point 1, et le point 4 est dominé par les points 3 et 5.

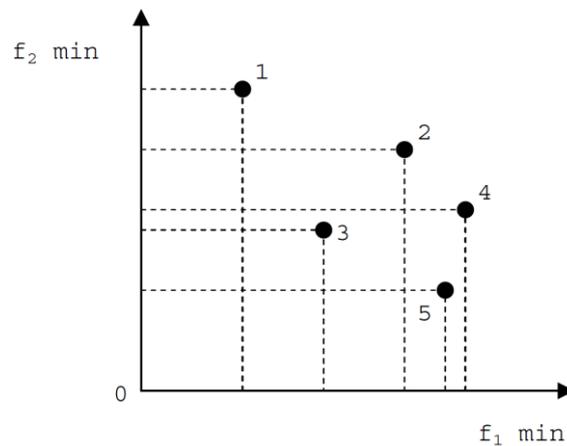


Figure 2.5. Exemple de dominance.

2.2.3.2.3.1.3 Frontière de Pareto

La frontière de Pareto est un ensemble de points Pareto-optimaux. Les solutions non dominées au sens de Pareto dans l'espace de conception sont dites Pareto-optimales et se trouvent sur le

front de Pareto dans l'espace des objectifs. Les solutions non dominées sont les solutions qui, par rapport à toute alternative, présentent une meilleure évaluation sur au moins un des objectifs. Une solution $\vec{x} \in x_f^n$ est dite non dominée ou Pareto-optimale si :

$$\nexists \vec{a} \in x_f^n : \vec{a} < \vec{x} \quad \text{Eq. (2.39)}$$

La Figure 2.6 montre un exemple de frontière de Pareto obtenue pour un problème d'optimisation à deux objectifs et pour différents scénarios de maximisation et de minimisation des fonctions objectif considérées.

Soit S l'ensemble des alternatives disponibles dans l'espace de conception, on appelle *ensemble optimal de Pareto* l'ensemble S^* des vecteurs de conception non-dominés dans S . Chaque solution de l'ensemble optimal de Pareto représente alors un compromis optimal du problème multi-objectif et ne peut être améliorée sur un objectif sans en dégrader au moins un autre. L'*ensemble optimal de Pareto* S^* et le *front de Pareto* F sont définis par :

$$S^* = \{ \vec{x} \in S \mid \vec{x} \text{ est Pareto-Optimal} \} \quad \text{Eq. (2.40)}$$

$$F = \{ f(\vec{x}) \in \mathbb{R}^M \mid \vec{x} \in S^* \} \quad \text{Eq. (2.41)}$$

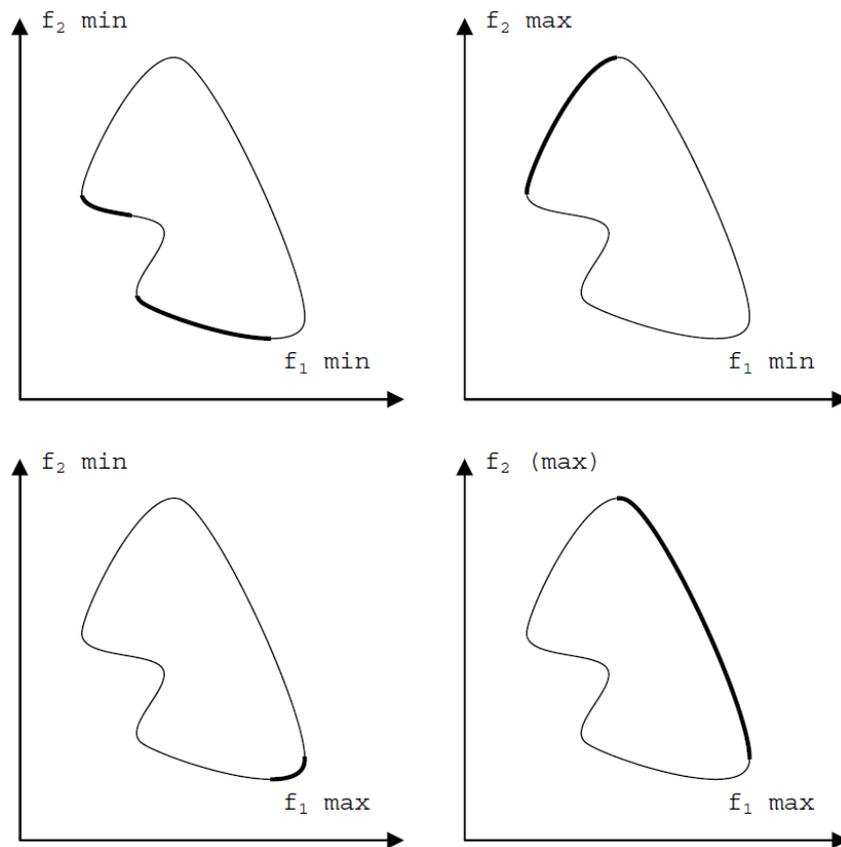


Figure 2.6. Exemples de frontière de Pareto.

2.2.3.2.3.1.4 Notion de domination contrainte

La notion de dominance-contrainte a été introduite pour enrichir la notion de dominance dans les problèmes d'optimisation multi-objectif avec contraintes. La plupart des méthodes de résolution des problèmes mono-objectif utilisent une approche basée sur l'attribution de pénalités en fonction des contraintes violées. Cette approche présente deux inconvénients :

- ✓ Elle exige de fixer les règles de pénalité ;
- ✓ Elle ne permet pas de distinguer entre deux individus ayant le même score où l'un viole les contraintes et l'autre non.

Une première définition de la domination contrainte a été donnée par Jiménez et Verdegay [226]. Ils utilisent un tournoi à deux individus i et j . Si i donne une solution réalisable et j une solution non réalisable, alors i est choisi. Si les deux individus donnent des solutions réalisables, ils sont comparés à un sous-ensemble d'individus choisis au hasard. Si les individus donnent des solutions non réalisables, ils sont comparés à un ensemble d'individus du même type. Le meilleur des deux ou celui qui se trouve dans la plus petite niche sera sélectionné.

Une autre définition a été proposée par Deb et al. [227]. Elle stipule qu'une solution i domine avec une contrainte une solution j si l'un des cas suivants est réalisé :

- ✓ La solution i est réalisable et la solution j ne l'est pas ;
- ✓ Les deux solutions i et j ne sont pas réalisables mais la solution i présente la plus petite violation totale de la contrainte ;
- ✓ Les deux solutions sont réalisables mais i domine j .

L'utilisation de cette notion nécessite que l'on puisse mesurer le niveau de violation de chaque contrainte du problème.

2.2.3.2.3.2 Algorithmes évolutionnistes

Les algorithmes évolutionnistes (ou algorithmes évolutionnaires) sont une famille d'algorithmes dont le principe est inspiré de la théorie de l'évolution pour la résolution de divers problèmes. Il s'agit donc de méthodes de calcul bio-inspirées. L'idée est de faire évoluer un ensemble de solutions à un problème donné, afin de trouver les meilleurs résultats. Ces algorithmes sont dits stochastiques, car ils utilisent de manière itérative des processus aléatoires.

La grande majorité de ces méthodes sont utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation, ce sont en quelque sorte des métaheuristiques, bien que le cadre général ne soit pas nécessairement dédié aux algorithmes d'optimisation au sens strict [228].

2.2.3.2.3.2.1 Principe de fonctionnement

Les algorithmes évolutionnaires sont nés dans les années 1960-1970 sous diverses formes : algorithmes génétiques proposés par Holland [229] et popularisés par Goldberg [223], programmation évolutionnaire [230] et stratégies d'évolution [231], Ces travaux ont ensuite débouché sur de nouvelles méthodes comme la programmation génétique [232] et les systèmes de classifieurs [223], désignés comme algorithmes évolutionnaires dans la thèse de Berro [219]. Certaines publications [233]–[235] placent dans cette même catégorie l'évolution différentielle [236], une méthode inspirée des algorithmes génétiques et des stratégies d'évolution. Enfin, l'état de l'art sur les méthodes informatiques évolutionnaires rédigé par Marsault dans le rapport final du projet de l'Agence Nationale de la Recherche « Conception éco-générative » [235] indique (p.55) que la famille des algorithmes évolutionnaires comprend également les algorithmes à estimation de distribution [237].

Les algorithmes évolutionnaires sont basés sur la théorie darwinienne de l'évolution des espèces [238], selon laquelle, dans une population d'individus, les gènes les plus susceptibles d'être transmis à la génération suivante d'individus sont ceux qui favorisent la survie ou la reproduction, et de connaissances plus modernes en génétique. Ainsi, chaque solution potentielle du problème d'optimisation est appelée « individu » et un groupe d'individus est appelé « population ». Chaque individu est représenté par un ou plusieurs chromosomes composés de gènes qui définissent l'individu. Ces gènes représentent les variables du problème à résoudre, qui peuvent prendre différentes valeurs, que l'on peut appeler « allèles » pour poursuivre l'analogie avec le vocabulaire utilisé en génétique. Dans un algorithme évolutionnaire, la population d'individus est manipulée à chaque itération pour former différentes générations, au sens généalogique du terme. Les individus de la population active sont appelés parents, par opposition aux individus créés par la reproduction des parents, qui sont appelés enfants.

À chaque génération, la population évolue à travers quatre opérations qui imitent les mécanismes impliqués dans l'évolution de l'espèce, à savoir :

- ✓ **Sélection pour la reproduction** : λ parents sont sélectionnés dans la population active de μ individus en fonction de leurs performances par rapport aux objectifs de l'optimisation. La population initiale étant générée de manière aléatoire, les performances de ces individus doivent être évaluées avant la sélection de la première itération ;

- ✓ **Reproduction** : cette phase est basée sur l'application de deux opérateurs de variation aux chromosomes des λ parents sélectionnés pour donner naissance à des λ enfants. Un opérateur de croisement permet de créer deux enfants (soit E_1 et E_2) en mélangeant aléatoirement des segments des chromosomes de deux parents (soit P_1 et P_2), comme le montre la Figure 2.7 pour un problème d'optimisation de la forme d'un quartier par rapport au rayonnement scolaire [5]. Un opérateur de mutation permet ensuite de modifier les allèles de certains gènes de certains individus de la nouvelle population, mais chacun a une certaine probabilité de se produire, et ces deux probabilités sont des paramètres de l'algorithme. La probabilité de mutation ne doit pas être trop élevée pour éviter de transformer le processus en une recherche aléatoire ;
- ✓ **Evaluation** : il s'agit d'évaluer les performances des λ enfants créés par rapport aux critères du problème considéré. Cette étape est souvent la plus coûteuse en termes de temps de calcul, notamment dans le cas où l'évaluation des individus nécessite la simulation d'un modèle complexe ;
- ✓ **Sélection pour le remplacement** : Afin de maintenir une population de taille constante au fil des générations, les μ individus sont sélectionnés (une ou plusieurs fois) parmi les λ enfants produits, et parfois aussi parmi les μ individus de la population active. Le choix des individus se fait en fonction de leurs performances sur les critères d'optimisation. Le groupe résultant de cette élection constitue la population active de la génération suivante.

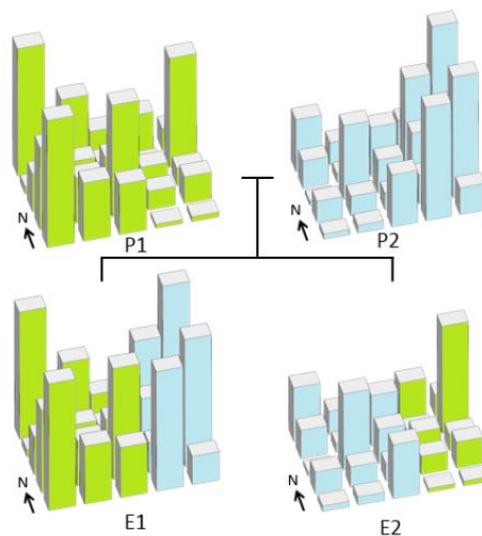


Figure 2.7. Schéma d'un croisement de deux quartiers selon des bandes Nord-Sud [239].

Le processus d'optimisation se termine lorsque le critère d'arrêt est atteint, qui prend la forme d'un nombre maximal de générations ou d'un pourcentage minimal d'évolution de la

performance des individus d'une génération à l'autre. La Figure 2.8 présente le fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire, accompagné de graphiques montrant les populations obtenues à différentes étapes du processus pour un problème de minimisation de deux fonctions objectif. Le processus est arrêté à la fin de la 70^{ème} génération.

Dans cet exemple, les μ individus sélectionnés pour former la population de la génération suivante sont choisis parmi un ensemble composé des μ individus de la population active et des λ enfants créés à partir des parents sélectionnés pour la reproduction. Étant donné que les opérations de croisement et de mutation peuvent aboutir à un enfant moins performant que ses parents, cette technique ne permet pas la perte de bons individus au cours du processus. Dans ce cas, la méthode d'optimisation est élitiste, c'est-à-dire qu'au moins certains des individus les plus performants sont conservés d'une génération à l'autre, qu'ils aient été produits à la génération précédente ou non.

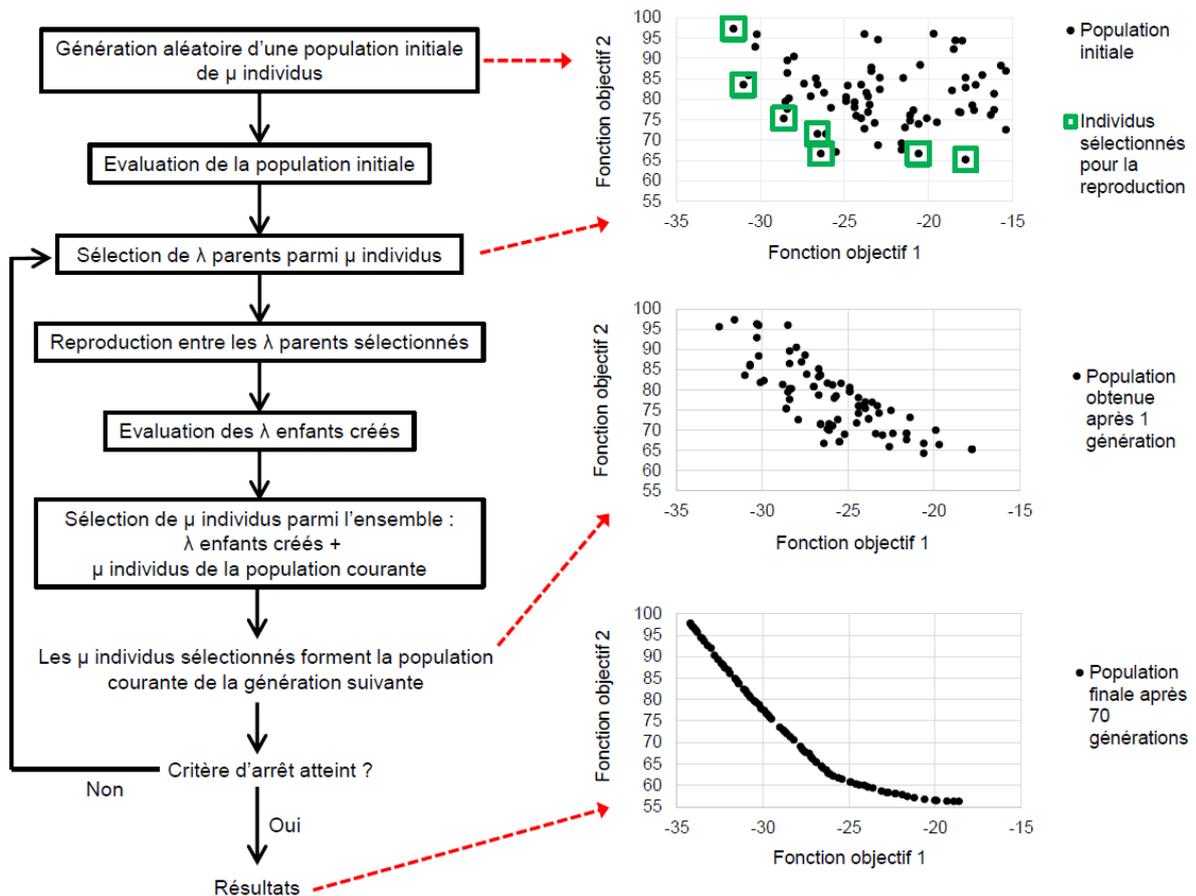


Figure 2.8. Schéma de principe d'un algorithme évolutionnaire [240].

2.2.3.2.3.2.2 NSGA-II

La littérature rapporte de nombreuses variantes d'algorithmes évolutionnaires, en particulier les algorithmes génétiques [241]. Le choix d'un algorithme particulier doit privilégier la qualité des

solutions obtenues et l'exploration de l'espace de recherche, influencée par les stratégies élitistes et le codage de l'information génétique sur les chromosomes.

Le NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) est l'un des algorithmes d'optimisation multi-objectif les plus populaires. Il possède trois caractéristiques particulières : une approche rapide de tri non-dominé, une procédure rapide d'estimation de la distance d'encombrement et un opérateur simple de comparaison d'encombrement [242]. Deb et al. [243] ont simulé plusieurs problèmes de test issus d'études antérieures grâce à l'utilisation du NSGA-II. Les résultats montrent que cette technique surpasse la PAES et la SPEA en termes de recherche d'un ensemble diversifié de solutions [244], [245].

Il ressort de l'Annexe 3-A, l'Annexe 3-B et l'Annexe 4 que les algorithmes génétiques sont non seulement les plus populaires pour la plupart des secteurs, mais aussi les plus répandus et les plus éprouvés dans le secteur du bâtiment, notamment le NSGA-II. Il s'adapte généralement bien aux différents environnements et peut résoudre un large éventail de problèmes différents. C'est donc sa robustesse et son efficacité relative qui ont guidé son choix comme technique d'optimisation pour l'étude présentée dans le chapitre suivant. Le principe de cet algorithme est présenté ci-dessous.

Comme tout algorithme génétique, le NSGA-II est basé sur l'évolution d'une population d'individus P_g (voir Figure 2.9). Les « enfants » Q_g sont d'abord générés par croisement et mutation d'individus de la population initiale. En effet, il existe de nombreuses méthodes de croisement et de mutation qui ne seront pas détaillées dans le présent rapport. En revanche, nous pouvons par exemple citer les techniques standards que nous avons utilisées pour l'étude présentée dans le chapitre suivant : la sélection par tournoi binaire et le croisement binaire simulé (SBX) [246], ainsi que la mutation polynomiale [247].

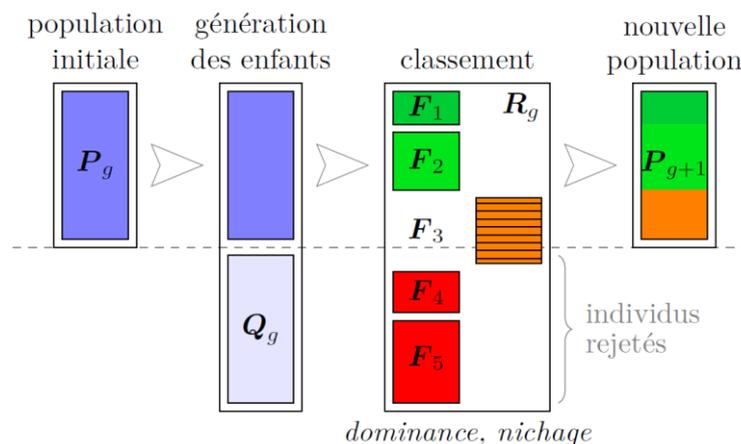


Figure 2.9. Obtention de la nouvelle population par croisement et mutation, puis classification par dominance et nichage [242].

Après les étapes de croisement et de mutation, une classification de la population est effectuée R_g qui regroupe les parents et les enfants pour ne garder que les meilleurs d'entre eux et créer la nouvelle population P_{g+1} . La particularité de NSGA-II réside dans la façon dont il classe les individus. Cette classification se fait en deux étapes, en commençant par un classement par dominance de Pareto. Le rang 1 est ainsi attribué à tous les individus non dominés de la population courante R_g et qui forment un front de Pareto. Ces individus sont ensuite retirés de la population et la même procédure est utilisée pour déterminer les individus de rang 2. Ce traitement est effectué récursivement en attribuant le rang k aux individus non dominés de la population initiale de laquelle ont été retirés les individus des rangs 1 à $(k - 1)$. Le processus s'arrête lorsqu'un rang unique a été associé à tous les individus de la population courante. Un exemple d'un classement pour un problème bi-objectif est présenté dans la Figure 2.10.

La deuxième étape du classement est basée sur une technique appelée « nichage ». Les individus des premiers rangs sont directement sélectionnés pour faire partie de la nouvelle population P_{g+1} , comme le montre la Figure 2.9. Mais cette population a une taille limitée, et il peut arriver que tous les individus du dernier rang sélectionné ne puissent en faire partie (rang F_3 dans notre exemple). On utilise donc la méthode de nichage pour différencier les solutions de même rang et choisir celles qui pourront rejoindre la nouvelle population. Le principe de cette technique est d'éviter de sélectionner des individus trop proches les uns des autres, afin que les solutions finales soient suffisamment diversifiées et bien réparties sur le front de Pareto. La Figure 2.10 nous montre que seulement certains points du front F_3 sont conservés, en veillant à retenir des points bien répartis sur le front.

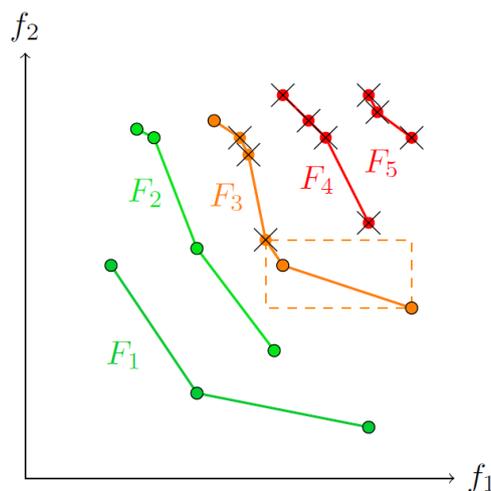


Figure 2.10. Classement des solutions dans l'algorithme NSGA-II par dominance puis par nichage pour F_3 . Les 10 solutions retenues sont entourées en noir, et celles rejetées sont marquées d'une croix.

Dans l'algorithme NSGA-II, l'évaluation de la densité de population présente autour d'un point donné est relativement simple. Le calcul de la distance de nichage pour classer un front F_i contenant des individus *NumberSolutions* est présenté dans l'Algorithme 2.1. La distance de nichage attribuée à un point donné correspond en effet à une distance de type Manhattan entre ses deux plus proches voisins dans le front. Les distances sont normalisées sur chacun des objectifs à l'amplitude maximale de variation de l'objectif. Les points extrêmes du front sont systématiquement sélectionnés dans la mesure où ils présentent une distance de nichage infinie. Enfin, les solutions ayant la plus grande distance de nichage sont classées en premier et seront donc sélectionnées en priorité pour faire partie de la nouvelle population.

Le processus général des opérations effectuées au cours d'une itération de NSGA-II est récapitulé dans l'Algorithme 2.2. Typiquement, on choisit une taille de population de l'ordre de *TaillePopulation* $\in [20, 100]$ et un nombre de générations *NombreGénérations* $\in [200, 500]$ (ces chiffres sont donnés à titre indicatif et doivent être adaptés en fonction de la difficulté du problème considéré). Le nombre d'évaluations des objectifs lors d'une optimisation est donc de l'ordre de (*TaillePopulation* x *NombreGénérations*).

La version standard de NSGA-II ne s'intéresse qu'aux objectifs du problème et ne permet pas de considérer les éventuelles contraintes. Cependant, des techniques similaires de classement des bords ont été développées pour traiter la présence de contraintes. Elles sont basées sur une mesure de la distance d'une solution par rapport à l'espace admissible [248].

Pour garder en mémoire toutes les solutions optimales parcourues au cours des itérations de l'algorithme, il suffit d'utiliser une archive dans laquelle on stocke les meilleurs individus obtenus à chaque génération. Seules les solutions optimales au sens de Pareto sont conservées, et un classement par dominance de Pareto est donc effectué à chaque nouvel ajout pour éliminer les solutions dominées. L'archive ayant une capacité limitée, un tri par nichage peut également être effectué. Le NSGA-II prévoit initialement de ne restituer que les individus optimaux de la dernière génération, mais l'utilisation d'une archive permet de s'assurer qu'aucune des solutions parcourues ne sera perdue, au prix d'un léger alourdissement de l'algorithme pour la gestion de cette archive.

Le NSGA-II permet enfin d'obtenir un ensemble de solutions qui forment une approximation du front de Pareto optimal du problème. Le décideur peut ensuite choisir parmi ces solutions le compromis qui lui convient le mieux.

Algorithme 2.1 : Classement_nichage (F_i)

1. $NombreSolutions \leftarrow |F_i|$
2. **pour** $j \in \{1, 2, \dots, NombreSolutions\}$ **faire**
3. $DistancesNichage[j] \leftarrow 0$
4. **fin**
5. **pour** $j \in \{1, 2, \dots, n_f\}$ **faire**
6. $T \leftarrow \text{Trier_selon_valeur_objectif}(F_i, f_j)$
7. $DistancesNichage[T_1] \leftarrow +\infty$
8. $DistancesNichage[T_{NombreSolutions}] \leftarrow +\infty$
9. $VariationGlobale f \leftarrow f_j(F_i[T_{NombreSolutions}]) - f_j(F_i[T_1])$
10. **pour** $k \in \{2, 3, \dots, NombreSolutions - 1\}$ **faire**
11. $\Delta f \leftarrow f_j(F_i[T_{k+1}]) - f_j(F_i[T_{k-1}])$
12. $DistancesNichage[T_k] \leftarrow DistancesNichage[T_k] + \frac{\Delta f}{VariationGlobale f}$
13. **fin**
14. **fin**
15. $\text{Trier_selon_distance}(F_i, DistancesNichage)$

Algorithme 2.2 : Principe de NSGA-II

1. **pour** chaque génération g de population P_g **faire**
2. $Q_g \leftarrow \text{Générer_fils}(P_g)$
3. Évaluer_objectifs(Q_g)
4. $R_g \leftarrow P_g \cup Q_g$
5. $F \leftarrow \text{Classement_dominance}(R_g)$
6. $P_{g+1} \leftarrow \emptyset$
7. $i \leftarrow 1$
8. **tant que** $|P_{g+1}| + |F_i| \leq \text{TaillePopulation}$ **faire**
9. $P_{g+1} \leftarrow P_{g+1} \cup F_i$
10. $i \leftarrow i + 1$
11. **fin**
12. Classement_nichage(F_i)
13. $P_{g+1} \leftarrow P_{g+1} \cup F_i[1 : \text{TaillePopulation} - |P_{g+1}|]$
14. **fin**

2.2.3.2.3.3 Recuit simulé

L'expérience physique de recuit utilisée par les métallurgistes a inspiré certains chercheurs à développer la méthode d'optimisation appelée « recuit simulé ». Cette expérience repose sur le principe de chauffer un métal à une température élevée puis de le refroidir lentement pour permettre aux atomes de s'ordonner avec moins d'énergie et d'obtenir ainsi un arrangement parfait.

Cette expérience constitue la base de la méthode d'optimisation par recuit simulé. Une configuration initiale est d'abord générée à partir de laquelle un calcul itératif est effectué. Un paramètre fictif qui contrôle l'algorithme est introduit, représentant la température pour les

métallurgistes. On définit ensuite une séquence de fonctions permettant de connaître la probabilité d'acceptation d'une mauvaise solution, pour chaque fonction objectif :

$$\Pi_i = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\Delta f_i}{T_n}\right) & \text{si } \Delta f_i > 0 \\ 1 & \text{si } \Delta f_i \leq 0 \end{cases} \quad \text{Eq. (2.42)}$$

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

$$t(\Pi, \lambda) = \prod_{k=1}^N (\Pi^k)^{\lambda^k} \quad \text{Eq. (2.43)}$$

Avec :

Π : Ensemble de Π_k , $k = \{1, \dots, N\}$

λ : Ensemble de λ^k , $k = \{1, \dots, N\}$

λ^k : Coefficient de pondération relatif à une fonction objectif.

Le principal avantage de cette méthode réside dans sa facilité de mise en œuvre et dans le fait qu'elle évite le piège des optima locaux. D'autre part, un nombre considérable de paramètres doit être défini dans l'algorithme de calcul, ce qui représente l'inconvénient majeur de cette méthode.

2.2.3.2.3.4 Algorithmes de colonies de fourmis

La méthode des colonies de fourmis s'inspire du comportement collectif des insectes sociaux. En s'appuyant sur la modification de leur environnement, elles sont capables de faire émerger un modèle global uniquement à partir des interactions entre les individus ou les composants de bas niveau du système.

Pour l'exploitation des sources de nourriture, les fourmis font preuve d'une grande efficacité collective. Initialement, tous les individus quittent la fourmilière, de manière aléatoire. En se déplaçant, ils déposent une piste de substances volatiles (phéromones), dont l'intensité influence leurs congénères. Ainsi, le processus d'optimisation du chemin entre le nid et une source de nourriture devient très simple. Les fourmis qui empruntent le chemin le plus court font nécessairement plus d'aller-retour dans le même temps. La piste de phéromones se renforce, elle attire localement mais progressivement toute la colonie.

La méthode des colonies de fourmis, introduite pour la recherche du plus court chemin, exploite les mêmes principes. Il s'agit d'une technique d'optimisation distribuée, basée sur une population de solutions, qui permet de procéder à une large exploration de l'espace de recherche.

Au départ, une population de solutions (pistes) est initialisée de façon aléatoire. A partir de ces premières solutions, les phéromones sont déposées par deux paramètres de modélisation : la visibilité et l'intensité de la solution. Sur chaque chemin partiel emprunté (solution partielle), la visibilité est une fonction des performances globales, l'intensité est liée au nombre d'individus de la population ayant utilisé cette solution partielle. Une solution globale (piste) est une séquence de chemins partiels. La visibilité et l'intensité contribuent à l'intensification de la recherche localement, autour des solutions courantes.

A chaque itération, les individus (fourmis) construisent chacun une solution (piste). Après avoir parcouru un certain chemin partiel, le choix du prochain sous-chemin est basé sur une règle probabiliste dépendant de la visibilité et de l'intensité des sous-chemins potentiels.

D'une itération à l'autre, les phéromones s'évaporent : l'intensité des solutions diminue avec le temps, en l'absence de renforcement par les individus de passage. Ce mécanisme est fondamental pour l'exploration à long terme de l'espace de recherche. Il garantit la possibilité de s'extraire des optimums locaux.

2.2.3.2.3.5 Algorithmes d'optimisation par essais particuliers

L'optimisation par essais de particules (PSO) est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur électrique) et James Kennedy (psychologue social) en 1995. Il a été inspiré à l'origine par le monde vivant, plus précisément par le comportement social des animaux évoluant en essaims, comme les bancs de poissons et les vols d'oiseaux. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une « intelligence » limitée et ne dispose que d'une connaissance locale de sa position dans l'essaim. L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester près des autres individus », « aller dans la même direction » ou « aller à la même vitesse », sont suffisantes pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs.

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés *particules*. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position

(le vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance réalisée par les particules « voisines » (informateurs) : chaque particule possède en effet un groupe d'informateurs, historiquement appelé son *voisinage*.

A chaque itération, les particules se déplacent dans l'espace de conception de dimension n pour converger vers la solution optimale. Le mouvement des particules est influencé par trois composantes, comme le montre la Figure 2.11 :

- ✓ Une composante physique (ou d'inertie) qui incite la particule à suivre la direction courante du mouvement de l'essaim ;
- ✓ Une composante cognitive qui incite la particule à se diriger vers la meilleure position qu'elle a obtenue dans le passé ;
- ✓ Une composante sociale qui encourage la particule à se diriger vers la meilleure position déjà obtenue par l'essaim.

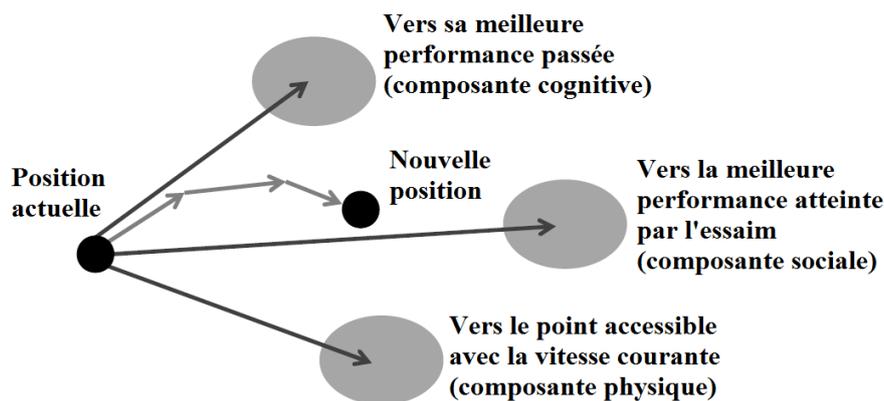


Figure 2.11. Déplacement d'une particule suivant trois composantes.

2.2.3.2.3.5.1 Optimisation mono-objectif par essaim particulaire (PSO)

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\vec{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\vec{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $\vec{P}best_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{iD})$. La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $\vec{G}best = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_D)$. On se réfère à la *version globale* de PSO, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation $\vec{G}best_i$.

Notons que le terme « vitesse » est ici abusif, car les vecteurs \vec{v}_i ne sont pas homogènes à une vitesse. Il serait plus approprié de parler de « *direction de déplacement* » [234]. Toutefois, pour respecter l'analogie avec le monde animal, nous préférons utiliser le terme « vitesse ».

Au début de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire/régulière dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace en combinant linéairement les trois composantes mentionnées ci-dessus. En effet, à l'itération $t + 1$, le vecteur \vec{x}_i et le vecteur \vec{v}_i sont calculés à partir de l'Eq. (2.44) et l'Eq. (2.45), respectivement.

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1}, \quad j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad \text{Eq. (2.44)}$$

$$v_{i,j}^{t+1} = wv_{i,j}^t + c_1r_{1,i,j}^t (pbest_{i,j}^t - x_{i,j}^t) + c_2r_{2,i,j}^t (gbest_j^t - x_{i,j}^t), \quad j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad \text{Eq. (2.45)}$$

Où w est le *poids d'inertie*, c_1 et c_2 sont les *constantes d'accélération*, r_1 et r_2 sont des valeurs aléatoires tirées de manière uniforme à partir de l'intervalle $[0,1]$ à chaque itération et pour chaque position. Cette position $Pbest_{i,j}$ (*Personal best*) représente la $j^{ième}$ variable de conception de la meilleure position courante ou passée atteinte par la particule i . $Gbest_j$ (*Global best*) représente la $j^{ième}$ variable de conception de la meilleure position atteinte par l'ensemble de l'essaim depuis le début de la procédure.

Les paramètres w , c_1 et c_2 contrôlent respectivement les comportements physique, cognitif et social des particules, et pondèrent ainsi le déplacement d'une particule selon les trois tendances présentées dans la Figure 2.11. Après avoir déterminé les nouvelles positions, chaque particule peut être tronquée sur les dimensions qui le nécessitent, sans affecter le comportement du processus de recherche [249].

Une fois les particules déplacées, les nouvelles positions sont évaluées et les deux vecteurs $\vec{P}best_i$ et $\vec{G}best$ sont mis à jour, à l'itération $t + 1$, selon l'Eq. (2.46) (dans un contexte de minimisation) et l'Eq. (2.47) (dans une version globale de PSO), respectivement. Cette procédure est présentée dans l'Algorithme 2.3, où N est le nombre de particules de l'essaim.

$$\vec{P}best_i(t+1) = \begin{cases} \vec{P}best_i(t), & \text{si } f(\vec{x}_i(t+1)) \geq \vec{P}best_i(t) \\ \vec{x}_i(t+1), & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.46)}$$

$$\vec{G}best(t+1) = \arg \min_{\vec{P}best_i} f(\vec{P}best_i(t+1)), \quad 1 \leq i \leq N \quad \text{Eq. (2.47)}$$

Algorithme 2.3 : Algorithme PSO (cas de minimisation)

1. **Initialiser** aléatoirement N particules : position et vitesse.
2. **Evaluer** les positions des particules
3. **Pour** chaque particule i , $\vec{P}best_i = \vec{x}_i$
4. **Calculer** $\vec{G}best$ selon l'Eq. (2.47)
5. **tant que** le critère d'arrêt n'est pas satisfait faire
6. **Déplacer** les particules selon l'Eq. (2.44) et l'Eq. (2.45)
7. **Evaluer** les positions des particules
8. **Mettre à jour** $\vec{P}best_i$ et $\vec{G}best$ selon l'Eq. (2.46) et l'Eq. (2.47)
9. **fin**

2.2.3.2.3.5.2 Optimisation multi-objectif par essaim particulaire (MOPSO)

Pour la résolution d'un problème à objectif unique, un seul *Global best*, mis à jour à chaque itération, est utilisé pour guider toutes les particules de l'essaim. Dans le cas d'un problème multi-objectif, il existe un ensemble de solutions non dominées (*ensemble optimal de Pareto*) parmi lesquelles un *Global best* doit être spécifiquement assigné à une particule. Cet ensemble optimal de Pareto est habituellement stocké dans une *archive externe* actualisée à chaque itération. L'archive externe, notée A , contient ainsi toutes les solutions non dominées au sens de Pareto par rapport à toutes les positions atteintes par les particules de l'essaim au cours des itérations successives. En d'autres termes, elle contient toutes les particules non dominées par rapport à la population courante et aux populations passées. Une alternative non dominée par rapport au contenu de l'archive sera ajoutée à A et tout membre de A dominé par un nouveau venu sera retiré de l'archive. Des règles d'inclusion dans l'archive peuvent être introduites afin de limiter la taille de l'archive. En effet, le nombre de solutions non dominées peut croître rapidement au fil des itérations et ainsi augmenter le temps de calcul nécessaire à la mise à jour de l'archive. Cependant, le choix de ces règles doit être adapté au problème considéré, sous peine d'affecter l'efficacité du processus de recherche [250].

L'un des problèmes majeurs des problèmes d'optimisation multi-objectif réside dans la sélection d'un *Personal best* et d'un *Global best* pour chaque particule afin de :

- ✓ Maximiser le nombre de solutions Pareto-optimales ;
- ✓ Maintenir la diversité de l'ensemble Pareto-optimal et assurer une distribution homogène des solutions sur le front de Pareto afin d'éviter une convergence prématurée vers une région localisée de l'espace objectif ;
- ✓ Minimiser la distance entre le front de Pareto généré et le front de Pareto réel.

Plusieurs adaptations de l'algorithme PSO à des problèmes multi-objectif sont listées dans le papier de Reyes-Sierra et Coello-Coello [251]. Notre attention se porte plus particulièrement sur l'approche développée par Alvarez-Benitez et al. [252], dans laquelle la sélection des leaders est basée exclusivement sur la dominance au sens de Pareto.

La stratégie employée pour choisir le *Personal best* est relativement simple : si la position courante \vec{x}_i^t de la particule i domine faiblement \vec{Pbest}_i ou si \vec{x}_i^t et \vec{Pbest}_i sont équivalents alors le *Global best* est choisi pour être la position courante telle que :

$$\vec{Pbest}_i = \begin{cases} \vec{x}_i^t & \text{si } \vec{x}_i^t \geq \vec{Pbest}_i \\ \vec{x}_i^t & \text{si } \vec{x}_i^t \sim \vec{Pbest}_i \\ \vec{Pbest}_i & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.48)}$$

Actuellement, trois stratégies peuvent être utilisées pour attribuer un *Global best* présent dans A à chaque particule de l'essaim [252]:

L'approche ***alentour*** contribue à la diversité de l'essaim en attirant les particules vers les zones les moins peuplées de l'espace des objectifs. Les solutions de A qui dominent le moins de particules (définies par leur position courante \vec{x}_i^t) seront ensuite privilégiées dans la sélection des leaders. En effet, Alvarez-Benitez et al. [252] ont constaté que les particules situées dans des régions peu peuplées ou aux extrémités du front de Pareto sont susceptibles de dominer moins de particules que celles situées au centre du front ou dans des régions plus peuplées. L'idée est d'identifier successivement le membre d'archive qui domine le moins de positions courantes et de choisir aléatoirement, parmi les particules qu'il domine, celle qu'il va guider. Le membre d'archive sélectionné comme guide est ensuite retiré de la liste des leaders potentiels (pour d'autres particules) tant que tout le contenu de A n'a pas été épuisé ;

L'approche ***aléatoire*** consiste à choisir au hasard un leader pour la position courante \vec{x}_i^t de la particule i parmi les membres de l'archive qui la dominent tel que :

$$\vec{Gbest}_i = \begin{cases} \vec{x}_a \in A & \text{avec la probabilité } |A|^{-1} \text{ si } \vec{x}_a \in A \\ \vec{x}_a \in A_i & \text{avec la probabilité } |A_i|^{-1} \text{ sinon} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.49)}$$

Où $A_i = \{\vec{x}_a \in A \mid \vec{x}_a > \vec{x}_i^t\}, \forall a = 1, \dots, |A|$ est l'ensemble des membres de l'archive qui dominent \vec{x}_i^t , Si $\vec{x}_i^t \in A$, le guide pour la particule i est sélectionné de manière aléatoire et uniforme (c'est-à-dire avec une probabilité égale) parmi tout le contenu de l'archive.

L'approche *probabiliste* est un compromis entre l'approche *alentour* et l'approche *aléatoire*. Elle consiste à guider les particules de l'essaim vers les régions les moins peuplées de l'espace des objectifs en favorisant les membres de l'archive qui dominant le moins de positions courantes. Tandis que dans l'approche aléatoire, toutes les solutions contenues dans A_i ont la même probabilité d'être choisies comme guide pour la particule i , leur probabilité d'être choisie dans l'approche probabiliste est inversement proportionnelle au nombre de particules qu'elles dominant, de sorte que :

$$\vec{G}best_i = \begin{cases} \vec{x}_a \in A \text{ avec la probabilité } \alpha |D_i|^{-1} \text{ si } \vec{x}_a \in A \\ \vec{x}_a \in A_i \text{ avec la probabilité } \alpha |D_i|^{-1} \text{ sinon} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.50)}$$

Où $D_i = \{\vec{x}_i^t \in x^t \mid \vec{x}_a > \vec{x}_i^t, \forall a = 1, \dots, N\}$ est l'ensemble des positions courantes dominées par \vec{x}_a . Ainsi, les membres de l'archive qui dominant le plus de positions courantes contenues dans x^t ont moins de chances d'être sélectionnés comme leaders.

Alvarez-Benitez et al. [252] suggèrent de privilégier l'approche *probabiliste*, qui conduit à une meilleure couverture du front de Pareto par rapport aux approches *alentour* et *aléatoire* ainsi qu'à une convergence relativement bonne. Ce qui implique le choix de l'approche *probabiliste* pour les applications de la méthode MOPSO dans l'étude présentée dans le chapitre suivant. Le pseudo-code du MOPSO considéré est présenté dans l'Algorithme 2.4.

Algorithme 2.4 : Algorithme MOPSO

1. **Initialisation** aléatoire des positions et des vitesses de chaque particule.
2. $t = 0$
3. **pour** chaque particule i , $\vec{P}best_i = \vec{x}_i^t$
4. **Stockage** des solutions non-dominées dans A
5. **Evaluation** de $\vec{G}best_i = selectGuide(\vec{x}_i^t, A)$
6. **tant que** le critère d'arrêt n'est pas atteint **faire**
7. **pour** $i = 1$ à N **faire**
8. **Déplacement** de la particule à l'aide de l'Eq. (2.44) et l'Eq. (2.45)
9. **Evaluation** des positions $f_m(\vec{x}_i^t), \forall m \in \{1, \dots, M\}$
10. **Mise à jour** des solutions non-dominées dans A
11. **Mise à jour** de $\vec{P}best_i$ avec l'Eq. (2.48)
12. **fin**
13. **Mise à jour** de $\vec{G}best_i = selectGuide(\vec{x}_i^t, A)$
14. $t = t + 1$
15. **fin**

Dans la littérature, l'ajout d'un facteur de turbulence a été proposé dans plusieurs versions de MOPSO [252]–[254], afin d'éviter les états de stagnation des particules et d'augmenter la

capacité exploratrice de l'algorithme. Plusieurs opérateurs ont été proposés avec différentes approches, qui peuvent être appliqués avec une certaine probabilité soit sur les composantes de position, soit sur les composantes de vitesse d'une ou plusieurs particules de l'essaim. Cependant, un tel facteur doit être utilisé avec précaution car il peut avoir des effets différents selon le problème multi-objectif considéré. De nombreuses applications de l'algorithme PSO n'intègrent pas de facteurs de turbulence et semblent néanmoins obtenir de bons résultats [251]. Dans l'intérêt d'utiliser un algorithme impliquant un nombre limité de paramètres de contrôle, les facteurs de turbulence n'ont pas été considérés dans l'étude présentée dans ce document.

2.2.3.2.3.6 Recherche tabou

La recherche Tabou est une méthode d'optimisation métaheuristique présentée par Fred W. Glover en 1986 [255]. Il s'agit d'une méthode itérative qualifiée de recherche locale au sens large.

Cette méthode est basée sur l'introduction d'une mémoire permettant de tirer des informations provenant des opérations précédentes. En effet, cela permet d'éviter lors de la recherche de l'optimum, les configurations devenues taboues et donc d'éviter les optima locaux déjà identifiés.

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

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

- ✓ L'intensification qui consiste à explorer d'autres zones de l'espace objectif afin d'identifier des solutions potentiellement intéressantes ;
- ✓ La diversification, qui permet de rediriger la recherche vers des zones rarement exploitées.

2.2.3.2.4 Autres méthodes

Il existe un très grand nombre d'autres métaheuristiques. La recherche dans le domaine étant très active, il est impossible de produire une liste exhaustive des différentes métaheuristiques d'optimisation. La littérature spécialisée montre un grand nombre de variantes et d'hybridations entre méthodes, particulièrement dans le cas des algorithmes évolutionnaires.

En effet, les méthodes d'optimisation les plus pertinentes dans la littérature (voir Annexe 3-A, Annexe 3-B et Annexe 4), en particulier dans le secteur du bâtiment [256], sont celles présentées

dans ce rapport. Toutefois, la littérature en mentionne d'autres qui ne présentent qu'une faible pertinence telles que la méthode GRASP [257], la recombinaison de chemins [258], l'évolution complexe mélangée [259], etc.

2.3 Problématique et lacunes

La transition énergétique représente une voie permettant de transformer le secteur énergétique mondial en passant des combustibles fossiles à une énergie sans carbone d'ici la seconde moitié de ce siècle. Récemment, il a été constaté que dans les années à venir, les ressources énergétiques conventionnelles, à savoir le pétrole, le charbon et le gaz, finiront par s'épuiser. Ceci est dû à la forte dépendance énergétique des populations vis-à-vis de ces ressources, ce qui constitue une véritable menace pour notre planète. Selon les différentes éditions des conférences des parties (COP) sur le changement climatique, l'un des principaux objectifs a été de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à au moins « bien en dessous de 2°C » pour ce siècle par rapport aux niveaux préindustriels. Les énergies renouvelables, combinées à des améliorations rapides de l'efficacité énergétique, sont la pierre angulaire d'une solution climatique durable. Maintenir l'augmentation de la température mondiale en dessous de 2° Celsius (°C) est techniquement réalisable. Cela serait également plus favorable d'un point de vue économique, social et environnemental que la politique et la planification en vigueur. Toutefois, le système énergétique mondial doit subir une transformation radicale pour passer d'un système fortement tributaire des combustibles fossiles à un système qui améliore l'efficacité énergétique et s'appuie sur les énergies renouvelables [1].

La principale solution alternative à la crise énergétique contemporaine, due à la fin de vie des sources d'énergie conventionnelles, ne peut être les énergies renouvelables [2], mais plutôt la fusion nucléaire [3]. Cependant, les énergies renouvelables demeurent une source considérable qui contribuera à une part acceptable des besoins énergétiques tout en réduisant le taux d'émission de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment, parmi les différents secteurs consommateurs d'énergie, semble être celui qui peut bénéficier de manière significative des énergies renouvelables. Ceci est dû, d'une part, au fait qu'il représente une part importante de la consommation énergétique et, d'autre part, à la possibilité d'intégrer plusieurs sources renouvelables, à savoir le photovoltaïque, les micro-éoliennes, la géothermie, etc.

En effet, dans le monde, ce secteur consomme environ 40% de l'énergie totale et contribue à 30% des émissions mondiales annuelles de gaz à effet de serre [4]. Au Maroc, il consomme environ 33.6% de la consommation totale d'énergie finale du pays, dont 25.4% pour le secteur

résidentiel et 8.2% pour le secteur tertiaire [5]. Par conséquent, ce secteur doit subir une mutation très importante puisqu'il constitue le deuxième plus grand consommateur d'énergie au Maroc. Dans cette perspective, une Réglementation Thermique de la Construction au Maroc (RTCM) [6] a été introduite pour réduire la consommation d'énergie tout en améliorant le confort thermique intérieur de manière à initier la construction de bâtiments à haute efficacité énergétique.

Dans le bâtiment, les économies d'énergie ne constituent pas le seul indicateur de performance attendu, mais d'autres indicateurs possibles sont également souhaitables, tels que le confort thermique, le confort visuel, le coût du cycle de vie, la protection de l'environnement, etc. (Voir la Figure 2.2). L'optimisation d'un ou plusieurs de ces indicateurs repose principalement sur l'optimisation multicritères des paramètres de l'enveloppe du bâtiment, qui se compose de plusieurs éléments tels que les parois opaques, les parois vitrées, les dispositifs d'ombrage, les ponts thermiques, etc. (Voir la Figure 2.2). La résolution de ce type de problème présente un niveau de complexité plus important, en particulier lorsqu'il s'agit d'une optimisation multi-objectif impliquant plusieurs variables de conception, car ces indicateurs de performance sont contradictoires, et le problème n'a pas une solution unique mais un ensemble de solutions constituant une frontière de Pareto. L'ensemble des solutions de la frontière sont toutes valables, avec différentes combinaisons de résultats pour chaque objectif (par exemple, une solution favorise l'efficacité énergétique et la protection de l'environnement, mais présente un déficit en matière de coût énergétique ; une autre pourrait être très bonne en matière d'efficacité énergétique et de coût énergétique, mais déficiente en matière de protection de l'environnement). A ce stade, la solution finale est choisie par le propriétaire du bâtiment. Les méthodes permettant d'obtenir l'ensemble de solutions attendues sont des méthodes numériques et nécessitent un temps d'itération très long pour être poursuivies. Ces méthodes sont principalement basées sur des simulations numériques d'une complexité assez élevée, qui sont utilisées pour représenter ou concevoir des systèmes. Leur utilisation directe pour des applications telles que l'optimisation, le contrôle ou la propagation d'incertitudes est problématique en raison du grand nombre d'évaluations à effectuer (souvent extrêmement coûteuses).

C'est pourquoi les chercheurs essaient de remplacer ces simulations par des modèles approximatifs plus rapides, comme décrit dans la section 2.2.2.2. Ces modèles, appelés « modèles de substitution » [260], se diffusent de plus en plus et sont utilisés comme moteur de simulation pour les processus d'optimisation. Ils permettent un plus grand nombre de

sollicitations, rendant ainsi possible les différentes applications mentionnées ci-dessus. Le processus d'optimisation est actuellement appliqué par l'utilisation de techniques numériques intelligentes [261]. Ces techniques impliquent des algorithmes qui s'inspirent des mécanismes de la nature, tels que les comportements, et empruntent leur inspiration à la biologie, la physique, la géographie, la culture sociale, comme décrit dans la section 2.2.3.2.

Cela permet d'affirmer que les processus basés sur les techniques mentionnées ci-dessus permettent de résoudre un problème d'optimisation donné, qui comprend éventuellement des indicateurs de performance, des variables de conception et des contraintes, de manière très rapide par rapport aux processus conventionnels. La sortie de ce processus réside dans la génération d'une frontière de Pareto, soit un ensemble de solutions qui serviront de support à la conception de bâtiments performants au regard des différentes performances considérées. En effet, les bâtiments qui ont fait l'objet de ce type d'optimisation sont souvent désignés dans la littérature par le terme « bâtiment à consommation énergétique quasi nulle » (si et seulement si le volet énergétique a été pris en compte parmi les performances considérées). Bien que ces bâtiments se caractérisent par leur faible consommation d'énergie, les besoins énergétiques (généralement ceux liés au chauffage et à la climatisation) restent considérables. Une source d'énergie électrique doit donc être prévue pour couvrir ces besoins. Cette source peut prendre la forme, idéalement, d'un système de production d'énergie local qui permettra au bâtiment de disposer d'une autonomie énergétique et donc d'une certaine indépendance vis-à-vis du réseau électrique public. Ce système peut être composé d'une ou plusieurs sources d'énergie renouvelables ou conventionnelles, incluant un éventuel système de gestion des flux énergétiques.

D'après l'aperçu présenté ci-dessus sur la présente problématique et la synthèse de la littérature présentée dans l'Annexe 3-A, l'Annexe 3-B et l'Annexe 4, il est possible de résumer les différentes lacunes à combler dans cet axe de recherche de la manière suivante :

- ✓ Quelle est l'approche optimale en termes de fiabilité, de précision et de temps de calcul, pour l'aide à la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique ?
- ✓ Quels sont les outils de calcul et les simulations numériques et dynamiques qui peuvent être utiles pour cette approche, de manière à ce qu'elle soit la plus optimale par rapport à celles qui existent dans la littérature ?
- ✓ Quelles sont les mesures à prendre en compte pour examiner son aptitude à être générique pour toute autre étude de cas ?

- ✓ Quel sera le taux d'autosuffisance énergétique du bâtiment lorsqu'un système de production d'énergie locale est prévu ?

2.4 Contribution et limites

La transition vers des bâtiments à haute efficacité énergétique est devenue effective pour les nouveaux bâtiments résidentiels dans certaines régions, comme la Californie, en vertu des normes d'efficacité des bâtiments (Titre 24) à partir de janvier 2020 [262]. Bien que d'autres pays visent le même objectif, il faudrait qu'il soit effectif au niveau mondial afin de mieux affronter la problématique actuelle qui constitue une véritable menace pour la planète.

La section 2.3 montre clairement que la recherche de la configuration optimale d'un bâtiment en termes de performances souhaitées représente une tâche difficile dans laquelle de nombreux intérêts et objectifs contradictoires doivent être examinés simultanément. A cet effet, de nombreux chercheurs ont récemment travaillé sur cet axe de recherche en proposant des méthodes de résolution qui combinent des modèles de substitution avec des algorithmes métaheuristiques, tels que les algorithmes génétiques, les algorithmes basés sur les essais de particules, les algorithmes de recherche d'harmonie, etc. [263].

En effet, les approches de résolution proposées pour la conception de bâtiments durables comprennent généralement trois étapes principales (voir section 2.2), à savoir la formulation du problème d'optimisation, la modélisation du modèle de substitution (en cas de passage par la métamodélisation), puis l'optimisation pour générer la frontière de Pareto. Comme mentionné ci-dessus, la partie métamodélisation est le facteur clé pour surmonter les obstacles calculatoires des processus de résolution, puisque la partie optimisation est généralement réalisée par l'un des algorithmes d'optimisation les plus réputés dans la littérature qui nécessitent un temps de convergence très court.

La littérature présentée par Li et al. [264], et celle récapitulée dans l'Annexe 3-A, l'Annexe 3-B et surtout l'Annexe 4 montre une revue synthétique des publications pertinentes pour cet axe de recherche qui porte sur les outils de conception de bâtiments durables. Les méthodes présentées dans cette revue de la littérature permettent de réduire le nombre de simulations, nécessaires pour une meilleure métamodélisation des modèles de substitution, jusqu'à 75% par rapport aux approches de résolution conventionnelles [24]. Dans la mesure où ce nombre de simulations présente un impact significatif sur le temps de calcul des processus de résolution dans leur intégralité. Toutefois, cela ne signifie pas que l'optimalité est atteinte et donc qu'il subsiste toujours des lacunes à combler à ce propos. En effet, le nombre de simulations pourrait

être encore réduit, et surtout, en toute indépendance d'un outil commercial de simulation thermique dynamique. L'Annexe 4 montre que le nombre de simulations requises par les méthodes de résolution proposées varie entre 50 et 35 040 en fonction des critères définis dans le problème d'optimisation considéré. En d'autres termes, une méthode de résolution qui peut conduire à résoudre un problème d'optimisation complexe, permettant de trouver la configuration optimale en termes de performances souhaitées, tout en assurant la fiabilité, la précision et la rapidité (par rapport à l'état de l'art) représente une contribution innovante à l'état actuel de la technique.

Dans cette perspective, le présent projet de thèse apporte, d'abord, une contribution qui réside dans la proposition d'une nouvelle méthode innovante et générique, basée sur des modèles de substitution et des algorithmes métaheuristiques pour la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique. Ensuite, une deuxième contribution qui réside dans la proposition d'un système hybride de production locale d'énergie électrique, doté d'une gestion optimale de l'énergie, afin d'atteindre une autosuffisance énergétique complète pour les bâtiments à haute efficacité énergétique.

Dans cette perspective, la principale contribution de ce projet de thèse réside dans la proposition d'une nouvelle méthode innovante et générique, basée sur des modèles de substitution et des algorithmes métaheuristiques pour la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique. Cette contribution fera l'objet d'une discussion détaillée dans le chapitre suivant, en mettant l'accent sur sa philosophie et sa méthodologie, son application à des cas particuliers, l'analyse de ses résultats et sa projection sur la problématique contemporaine. Cette contribution présente toutefois certaines limites qui peuvent être résumées comme suit :

- ✓ Le nombre de simulations nécessaires à l'élaboration du modèle de substitution possède une limite inférieure ;
- ✓ Le modèle de substitution élaboré n'est valable que pour le bâtiment étudié.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique de l'aide à la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique. Les trois phases fondamentales de toute approche de résolution d'un problème d'optimisation appliqué au secteur du bâtiment sont présentées.

Afin de remédier à cette problématique, nous avons présenté une revue de la littérature sur les différentes méthodes existantes d'optimisation des performances des bâtiments et nous avons illustré les différentes anomalies de ces méthodes qui compliquent la tâche des concepteurs et des décideurs pour prendre des décisions rationnelles dans un temps de calcul raisonnable.

Enfin, nous avons présenté les éléments clés et les limites de la contribution apportée à la recherche de la configuration optimale des bâtiments au regard des performances souhaitées.

Le chapitre suivant sera consacré à l'application (présentation, simulations et analyse des résultats) de cette contribution pour un type de bâtiment donné, des conditions climatiques exemplaires et des systèmes spécifiques. L'objectif est de proposer des solutions rationnelles pour la conception de bâtiments confortables et efficaces sur le plan énergétique.

Chapitre. 3 : Nouvelle approche pour l'aide à la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique

3.1 Introduction

Le chapitre précédent a fait le point sur les moyens d'aide à la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique. Cette synthèse a permis de conclure que le recours à une méthode de résolution qui peut conduire à la résolution d'un problème d'optimisation complexe, permettant de trouver la configuration optimale en termes de performances souhaitées, tout en assurant la fiabilité, la précision et la rapidité, représente une contribution innovante à l'état actuel de la technique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une nouvelle approche de résolution pour l'aide à la conception de bâtiments confortables et efficaces sur le plan énergétique. Cette présentation comprend la description générale des éléments fondamentaux de l'approche proposée, ses atouts et son application. L'objectif est de fournir des solutions techniques relatives aux configurations optimales de l'enveloppe du bâtiment qui permettent, de manière simultanée, de minimiser les besoins énergétiques tout en assurant un meilleur confort thermique.

La solution optimale sélectionnée sera ensuite évaluée au regard de son taux d'autosuffisance énergétique, grâce à l'intégration d'un système hybride de production locale de l'énergie électrique.

3.2 Méthode proposée

Les maîtres d'ouvrages, les bureaux d'études et les architectes sont confrontés à un véritable défi, notamment en raison du nombre important de paramètres et de critères à prendre en considération. Il sera donc nécessaire de développer une méthode d'aide à la prise de décision multicritères qui leur permettra de faire plus facilement des choix optimaux. La méthode présentée dans ce chapitre permet ainsi de remédier à cette problématique d'une manière innovante par rapport à l'état actuel de la technique.

3.2.1 Présentation

Actuellement, les bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique ne peuvent pas se comporter comme des bâtiments traditionnels, puisqu'ils sont caractérisés par une très faible consommation d'énergie et un environnement intérieur confortable. Une modélisation détaillée de leur comportement thermique est nécessaire pour décrire les variations linéaires ou non linéaires des performances du bâtiment. Ces variations peuvent être contrôlées puis optimisées par des techniques de simulation de la performance des bâtiments [265], notamment celles basées sur la métamodélisation, tant pour les bâtiments neufs que pour ceux faisant l'objet de rénovations importantes.

Comme indiqué dans le chapitre précédent, l'un des principaux défis des techniques de simulation de la performance des bâtiments est le temps de calcul élevé qu'elles impliquent [85]. La méthode proposée dans ce rapport de thèse est capable de surmonter ce défi, grâce à son métamodèle qui a été développé sur la base d'un modèle mathématique bien défini, conformément aux principes physiques fondamentaux et aux bonnes pratiques d'ingénierie.

L'approche proposée est principalement basée sur un nouveau concept innovant conçu pour répondre aux différentes exigences des bâtiments confortables et à consommation énergétique quasi nulle, tout en garantissant un degré élevé de fiabilité et de précision et un temps de calcul très réduit. L'exécution fructueuse de cette approche implique 3 étapes principales (voir Figure 3.1), qui seront abordées une par une dans les sections suivantes, à savoir : la formulation du problème d'optimisation, la pré-optimisation et l'optimisation.

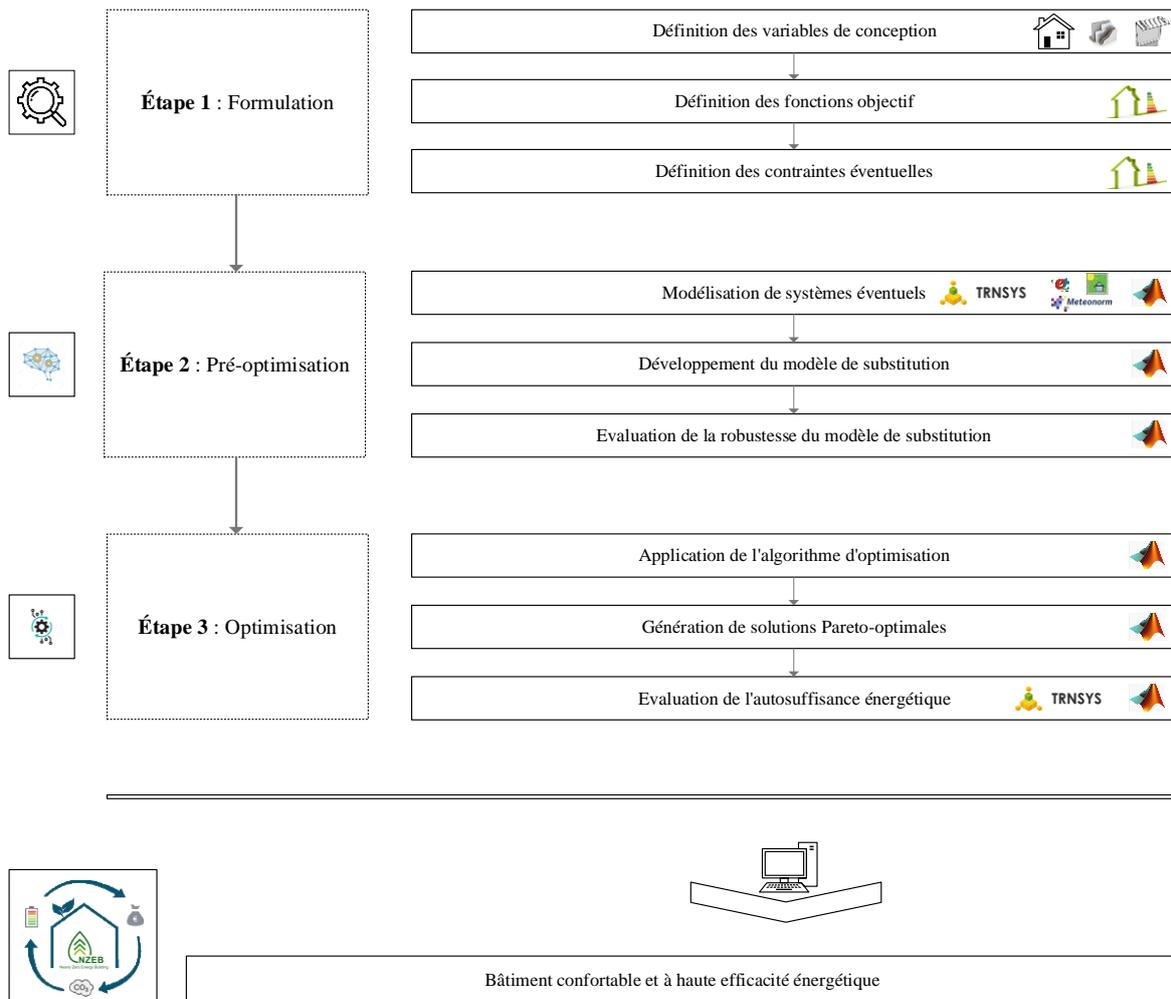


Figure 3.1. Illustration des étapes fondamentales de l'approche proposée

3.2.2 Formulation

3.2.2.1 Définition des variables de conception

Au Maroc, le RTCM aborde la question de l'efficacité énergétique des bâtiments à travers deux approches, dont la première est appelée perspective et la seconde, performantielle. Selon l'approche perspective, qui est liée à la conception du bâtiment, certains paramètres thermo-physiques de son enveloppe sont bien recommandés, à savoir le coefficient de transmission thermique des murs extérieurs, de la toiture, des fenêtres, la résistance thermique du sol et le facteur solaire des vitrages. D'après ce que nous avons présenté dans la section 2.2.1.1, il est clair que cela indique la présence de lacunes en termes de variables de conception, qui constituent une anomalie quant à la résolution de la problématique principale.

Afin d'optimiser les deux fonctions objectif définies ci-dessous, une sélection très pertinente de variables de conception par rapport à la finalité envisagée a été effectuée, comme le présentent le Tableau 3.1 et le Tableau 3.2. Ces variables présentent en effet un intérêt majeur pour les architectes, les ingénieurs et toutes les parties prenantes à cet axe de recherche, car elles

possèdent un impact significatif sur ces deux fonctions objectif. La sélection de ces variables de conception n'a pas été faite au hasard, mais plutôt à travers toute une étude bibliographique qui rassemble les travaux de recherche récents qui décortiquent la même problématique (voir Annexe 3-A et Annexe 3-B), tout en tenant compte de l'anomalie présentée dans le RTCM.

3.2.2.1.1 Parois opaques

Le flux de chaleur à travers l'enveloppe représente le principal gain ou perte de chaleur d'un bâtiment. En conséquence, l'optimisation du transfert de chaleur à travers les parois opaques constitue un élément important pour la conception de bâtiments à haute performance. À cet égard, U_M , U_T , U_P , α_M , α_T et P_t sont sélectionnés comme étant des variables de conception. La limite supérieure des coefficients de transfert de chaleur est définie en fonction des coefficients du bâtiment de référence, puisqu'il s'agit de l'un des bâtiments les plus consommateurs d'énergie, tandis que la limite inférieure est définie conformément aux meilleures pratiques existantes. Les limites des coefficients d'absorption solaire des revêtements muraux opaques, notamment ceux des murs extérieurs et du toit, sont définies en fonction des caractéristiques d'absorption des revêtements existants sur le marché. Enfin, les limites pour les ponts thermiques sont définies comme suit : limite inférieure selon la recommandation du label Passivhaus (voir section 1.3.1.3.4), tandis que la limite supérieure est définie en fonction de la situation du bâtiment de référence.

Où U_M est le coefficient de transmission des murs extérieurs en $[W.m^{-2}.K^{-1}]$, U_T est le coefficient de transmission du toit en $[W.m^{-2}.K^{-1}]$, U_P est le coefficient de transmission du plancher en $[W.m^{-2}.K^{-1}]$, α_M est le coefficient d'absorption du rayonnement solaire des murs extérieurs [-], α_T est le coefficient d'absorption du rayonnement solaire du toit [-], P_t est le coefficient linéaire des ponts thermiques en $[W.m^{-1}.K^{-1}]$.

3.2.2.1.2 Parois vitrées

Les parois vitrées nécessitent généralement une attention particulière, car elles représentent la partie la plus fragile de l'isolation de l'enveloppe du bâtiment. À cet égard, Glz est choisi comme une variable de conception composée de 5 niveaux, dont chacune est composée de plusieurs paramètres, à savoir U_g , SHGC, T-s, R-s et T-v (voir Tableau 3.1). Ce dernier est défini comme étant une variable discrète en raison des différentes typologies disponibles sur le marché (simple vitrage, double vitrage, triple vitrage, etc.).

Où U_g est le coefficient de transmission du vitrage en $[W.m^{-2}.K^{-1}]$, SHGC est le coefficient de gain de chaleur solaire [-], T-s est la transmission solaire [-], T-v est la transmission visuelle [-] et R-s est la réflectance solaire [-].

3.2.2.1.3 Ombrage

Les dispositifs d'ombrage représentent un moyen efficace pour réduire la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment par les fenêtres exposées à la lumière. Cela permet de conserver la fraîcheur à l'intérieur du bâtiment. À cet égard, Scw-n, Scw-s et Scw-e sont sélectionnés comme étant des variables de conception liées au rapport entre la surface non transparente du dispositif de protection solaire et la surface vitrée totale. La limite inférieure indique qu'il n'y a pas de protection solaire, tandis que la limite supérieure indique que les fenêtres sont protégées à 100% du rayonnement solaire.

Où Scw-n est le coefficient d'ombrage des fenêtres orientées vers le Nord [-], Scw-s est le coefficient de protection solaire des fenêtres orientées vers le Sud [-], Scw-e est le coefficient de protection solaire des fenêtres orientées vers l'Est [-].

3.2.2.1.4 Renouvellement d'air

Le renouvellement d'air est un élément primordial dans un bâtiment, notamment pour ses occupants. Cependant, il peut devenir un facteur extrêmement critique, en termes de consommation d'énergie, s'il n'est pas bien contrôlé. À cet égard, le taux de renouvellement d'air global (ACH) est choisi comme étant une variable de conception pour l'infiltration d'air et la ventilation. La limite inférieure est définie en fonction du fait qu'il n'existe pas de bâtiment purement étanche à l'air, tandis que la limite supérieure est définie en fonction de la situation du bâtiment de référence.

Tableau 3.1. Les modèles de fenêtres externes considérés pour la variable x_{11} .

Désignation	Symbole	Épaisseur [mm]	U_g	SHGC	T-s	R-s	T-v
FLOAT_19	Glz ₁	19	5.160	0.682	0.600	0.070	0.830
Insulating. 2.8	Glz ₂	4/16/4	2.830	0.755	0.693	0.126	0.817
Luxguard SUNGUARD CLEAR PLUS Argon. 2.6	Glz ₃	6/16/4	2.300	0.295	0.214	0.195	0.292
Pilk. 3-ple INFRASTOP Brilliant5025+OPTITHERM S #5	Glz ₄	6/12/4/12/4	0.700	0.222	0.177	0.329	0.436
Insulating. 0.4. Xenon	Glz ₅	4/8/4/8/4	0.400	0.408	0.268	0.231	0.625

Tableau 3.2. Les différents niveaux des variables de conception sélectionnées.

Désignation	Symbole	Variable correspondante	Unité	Type	Limite inférieure	Limite supérieure	Step	Niveau
Coefficient de transmission des murs extérieurs	U_M	x_1	$W.m^{-2}.K^{-1}$	Continue	0.1	1.9	0.18	11
Coefficient de transmission de la toiture	U_T	x_2	$W.m^{-2}.K^{-1}$	Continue	0.1	2.5	0.24	11
Coefficient de transmission du plancher	U_p	x_3	$W.m^{-2}.K^{-1}$	Continue	0.1	2.9	0.28	11
Coefficient d'absorption des murs extérieurs	α_M	x_4	-	Continue	0.1	0.9	0.08	11
Coefficient d'absorption de la toiture	α_T	x_5	-	Continue	0.1	0.9	0.08	11
Coefficient linéaire des ponts thermiques	P_t	x_6	$W.m^{-1}.K^{-1}$	Continue	0.01	1	0.099	11
Renouvellement d'air par heure	ACH	x_7	$v.h^{-1}$	Continue	0.1	1.1	0.1	11
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers le Nord	Scw-n	x_8	-	Continue	0	1	0.1	11
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers le Sud	Scw-s	x_9	-	Continue	0	1	0.1	11
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers l'Est	Scw-e	x_{10}	-	Continue	0	1	0.1	11
Vitrage	Glz	x_{11}	-	Discrète	Glz ₁	Glz ₅	-	5

3.2.2.2 Définition des fonctions objectif

L'évaluation de la configuration de l'enveloppe du bâtiment peut être établie selon différents indicateurs, à savoir les besoins énergétiques, le confort thermique, le confort visuel, le confort acoustique, la qualité de l'air intérieur, l'impact économique et environnemental, etc. (voir Section 2.2.1.2). Dans cette étude, deux indicateurs de performance sont retenus, à savoir les besoins énergétiques et le confort thermique des occupants, dans la mesure où ils représentent un degré d'impact très significatif par rapport aux autres [264], [266], [267]. Pour identifier les interactions entre ces deux performances, deux fonctions objectif, à savoir la demande annuelle d'énergie thermique, en particulier celle du chauffage et de la climatisation, et les degrés heures d'inconfort, sont minimisées simultanément.

3.2.2.2.1 Demande annuelle en énergie thermique (ATED)

Une étude a été réalisée par nos soins sur l'effet d'un seul paramètre thermo-physique, soit l'introduction de l'isolation thermique au niveau des parois opaques (résistance thermique), sur les besoins énergétiques d'un bâtiment résidentiel typique et ce, dans différentes zones climatiques. Les résultats ont montré que ce paramètre possède un impact très important sur la performance énergétique du bâtiment, permettant de réduire les besoins en chauffage et en climatisation jusqu'à 26.53% et ce, en fonction de la zone climatique considérée [268].

Ceci nous permet d'imaginer à quel point le taux de réduction de ces besoins énergétiques serait important dans le cas d'une étude impliquant plusieurs éléments thermo-physiques. C'est pourquoi un tel indicateur devrait être l'un des principales fonctions objectif dans un problème d'optimisation lié à la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique.

L'ATED est défini comme un indicateur de performance, représentant la somme des besoins en chauffage et en climatisation sur la surface totale conditionnée du bâtiment étudié. Dans ce travail, la demande en énergie pour l'éclairage artificiel, l'eau chaude sanitaire et les équipements électroménagers n'a pas été prise en compte, puisqu'elle représente environ moins de 30% de la demande totale en énergie. La fonction objectif de l'ATED peut donc être calculée selon l'Eq. (3.1) [269].

$$ATED = \frac{1}{A_c} \times (Q_h + Q_c) \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Où Q_c est la demande totale en chaleur pour la climatisation en $[\text{kWh.an}^{-1}]$, Q_h est la demande totale en chaleur pour le chauffage en $[\text{kWh.an}^{-1}]$ et A_c est la surface totale des zones conditionnées en $[\text{m}^2]$.

3.2.2.2 Moyenne annuelle pondérée des degrés-heures d'inconfort (ADH)

L'évaluation du confort thermique peut être réalisée à l'aide de plusieurs méthodes, telles que le calcul du nombre d'heures pendant lesquelles les occupants se sentent inconfortables, le modèle de confort thermique adaptatif ASHRAE, le modèle de confort thermique Fanger et le modèle de confort thermique adaptatif EN (voir section 2.2.1.2.3.1). Sur la base de ces méthodes, nous avons développé une nouvelle logique de la méthode dite adaptative pour évaluer le confort thermique par le calcul des valeurs de DH [61], [174]. Le détail de cette méthode est présenté dans la section 2.2.1.2.3.1.

L'ADH est défini comme un indicateur, représentant la moyenne annuelle pondérée des degrés-heures, pendant lesquels l'occupant se sent inconfortable, dans des zones où il/elle devrait se sentir plus confortable. La fonction objectif ADH peut donc être calculée selon l'Eq. (3.2) :

$$ADH = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n DH_k \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Où DH_k est le degré-heure d'inconfort en $[\text{°C.heure.an}^{-1}]$.

3.2.2.3 Définition des contraintes

L'optimisation est généralement définie comme étant la sélection du meilleur candidat parmi un ensemble d'alternatives disponibles en fonction de certains critères. Dans le cas le plus simple, un problème d'optimisation vise à trouver la valeur minimale ou maximale d'une fonction en choisissant un certain nombre de variables soumises à un certain nombre de contraintes en fonction de la spécificité du problème. La fonction d'optimisation est également

appelée fonction fitness ou fonction objectif, qui est souvent calculée par des outils de simulation numérique. Dans cette étude, le problème d'optimisation consiste à minimiser les deux fonctions (f_1, f_2) définies par l'Eq. (3.1) et l'Eq. (3.2), tel que décrit mathématiquement par l'Eq. (3.3) :

$$\min_x f(X_z) = \begin{cases} f_1 = \text{Net}_1(X_z) \\ f_2 = \text{Net}_2(X_z) \end{cases} \quad \forall X \in \mathbb{R}^+ \quad \text{Eq. (3.3)}$$

Soumis aux contraintes présentées par l'Eq. (3.4) :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 > 0 \text{ et } f_2 > 0 \\ 0.1 \leq x_1 \leq 1.9 \\ 0.1 \leq x_2 \leq 2.5 \\ 0.1 \leq x_3 \leq 2.9 \\ 0.1 \leq x_4, x_5 \leq 0.9 \\ 0.01 \leq x_6 \leq 1 \\ 0 \leq x_7, x_8, x_9, x_{10} \leq 1 \\ 1 \leq x_{11} \leq 5 \end{array} \right. \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Où Net_1 et Net_2 correspondent aux métamodèles qui décrivent le comportement thermique du bâtiment respectivement pour l'ATED et l'ADH. X_z est l'ensemble des variables de conception considérées.

3.2.3 Pré-optimisation

Comme indiqué précédemment, l'étape de pré-optimisation permet de faire le lien entre la formulation du problème considéré et son optimisation. Le but de ce processus, qui correspond éventuellement à celui de la métamodélisation, est d'aboutir à un ou plusieurs modèles de substitution capables de décrire de manière optimale le comportement thermique du bâtiment. Ce processus est accompli en 2 étapes fondamentales qui ne sont autres que la modélisation et le développement du modèle de substitution.

3.2.3.1 Modélisation

3.2.3.1.1 Description du bâtiment de référence

Le bâtiment qui fait l'objet de l'application de la méthode proposée correspond à une maison typique R+1, souvent construite dans la région de Marrakech au Maroc, avec trois façades. La Figure 3.2, la Figure 3.3 et la Figure 3.4 montrent les plans architecturaux 3D et 2D de cette maison ainsi que leurs dimensions conçues et modélisées avec AutoCAD [270] et SketchUp [271]. Chaque niveau a une surface au sol de 140m^2 et une hauteur de 3m. Le rez-de-chaussée

comprend deux salons, un séjour, une cuisine et un WC. Quant au premier étage, il comprend deux chambres, deux dressings, deux WC, une suite parentale et un séjour. Chaque niveau est par ailleurs occupé par quatre personnes (deux adultes et deux enfants).



Figure 3.2. Illustration des étapes fondamentales de l'approche proposée

3.2.3.1.2 Zonage thermique

Le zonage climatique permet de regrouper un ensemble de zones dont les températures et les conditions météorologiques sont similaires. Le bâtiment étudié est divisé en 13 zones thermiques. Les deux WC du premier étage sont considérés comme une seule zone (11) en raison de la similarité de leurs géométries et de leurs gains thermiques internes. Quant à la cage d'escalier, elle est modélisée comme étant une partie de la maison puisqu'il n'y a pas de séparation thermique. La Figure 3.3 et la Figure 3.4 montrent le zonage thermique de cette maison.

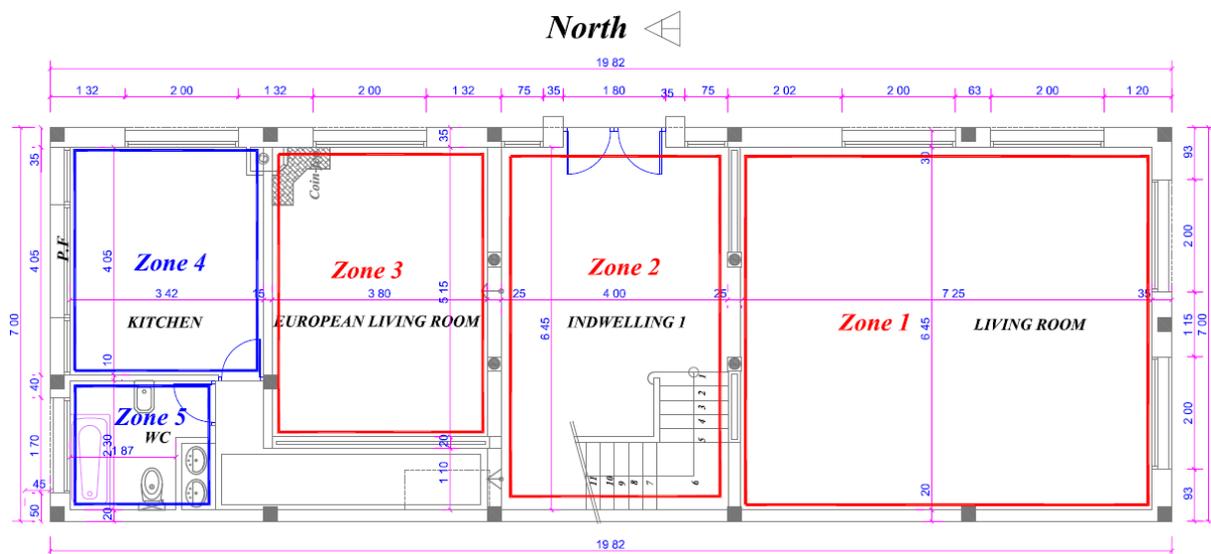


Figure 3.3. Plan 2D du rez-de-chaussée et zonage thermique.

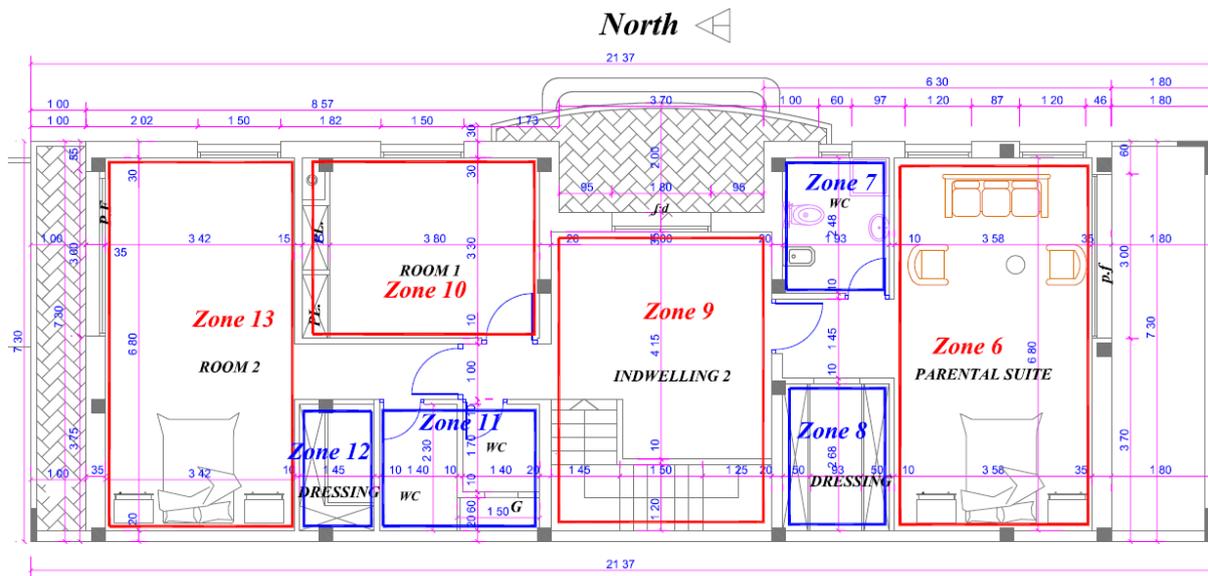


Figure 3.4. Plan 2D du premier étage et zonage thermique.

3.2.3.1.3 Modélisation du processus de simulation

La mise en application de la méthode proposée nécessite l'utilisation d'un outil permettant la modélisation du bâtiment de référence, ainsi que la réalisation de sa simulation thermique dynamique (STD). En effet, la STD consiste à étudier sur une période définie d'au moins quelques jours, au pas de temps horaire ou moins, le comportement thermique d'un bâtiment, soit de son enveloppe, soit de ses systèmes techniques. Ce calcul prend en compte tous les paramètres ayant une influence sur le bilan énergétique, à savoir les gains internes et externes, l'inertie thermique, la transmission à travers les parois, etc.

Dans les travaux de cette thèse, les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel TRNSYS [272], la référence mondiale dans le domaine de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes, en combinaison avec la plateforme TRNBuild [273]. Il s'agit d'un package de simulation complet, proposé par le CSTB [274] et reconnu par l'ASHRAE [275], contenant plusieurs outils, des programmes de moteurs de simulation, une connexion graphique avec des traceurs, des feuilles de calcul, etc. C'est un outil intégré et intelligent qui peut être utilisé de la conception du projet à la simulation. Il offre une grande précision, une flexibilité et une personnalisation infinie, une granularité élevée des données rapportées et la possibilité de le coupler avec d'autres logiciels comme Matlab, Contam, Comis, Fluent, etc.

Grâce à ce package, une plateforme a été conçue et développée (voir Figure 3.5) pour simuler les différents échantillons nécessaires à la création de la base de données attendue, qui constitue un élément fondamental pour le développement des modèles de substitution.

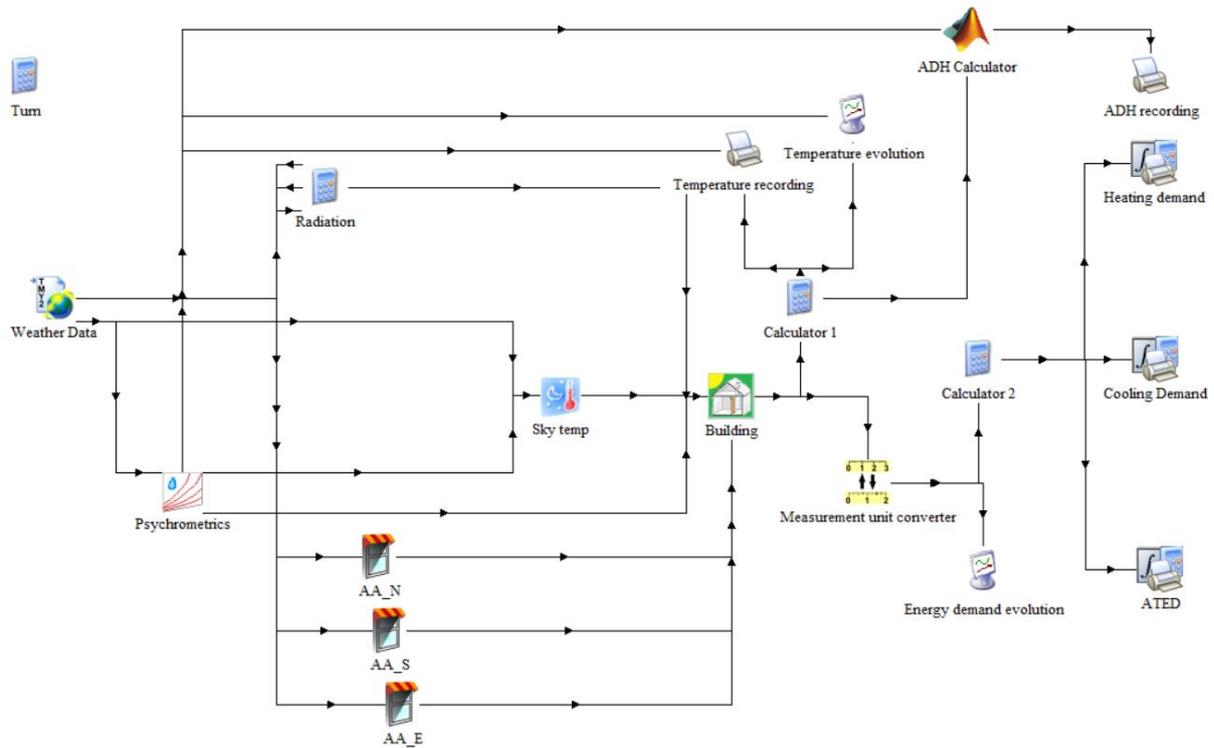


Figure 3.5. Plate-forme de calcul dans l'environnement TRNSYS.

Avant de commencer la simulation, il est nécessaire de fournir les caractéristiques du bâtiment de référence, telles que la géométrie, l'orientation, les paramètres thermo-physiques des parois opaques et vitrées, les gains de chaleur internes, les conditions de conditionnement d'air et les données météorologiques.

3.2.3.1.3.1 Composition de l'enveloppe

Le Tableau 3.3 présente la composition des parois opaques et vitrées du bâtiment étudié. Les propriétés thermo-physiques collectées sont issues de la bibliothèque perspective BINAYAT de l'AMEE [276], selon la description technique de la composition de l'enveloppe du bâtiment.

Où λ est la conductivité thermique en $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, R est la résistance thermique en $[\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$, C est la capacité thermique en $[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, ρ est la densité en $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$, α_t est la diffusivité thermique en $[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$, E_t est l'effusivité thermique en $[\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}]$. T_{ps} est le déphasage thermique en [heure], U_g est le coefficient de transmission du vitrage en $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$, SGHC est le coefficient de gain de chaleur solaire [-] et WWR est le taux global des baies vitrées (rapport fenêtre/mur) en [%].

Tableau 3.3. Composition et propriétés thermo-physiques des parois opaques et vitrées.

Élément de construction	Matériau	Épaisseur [cm]	λ	C	ρ	α_t	E_t	T_{ps}
Mur extérieur	Ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
	Terre crue	10.00	1.04	1.00	2350	$4.43.10^{-7}$	1563.33	3.46
	Lame d'air	5.00			$R = 0.18 \text{ m}^2\text{K.W}^{-1}$			
	Terre crue	10.00	1.04	1.00	2350	$4.43.10^{-7}$	1563.33	3.46
	Ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
Toiture	Plâtre	2.00	0.56	1.00	1350	$4.15.10^{-7}$	869.48	0.71
	Hourdis	20.00	1.32	1.00	1327	$9.91.10^{-7}$	1321.64	4.62
	Béton	5.00	2.00	1.00	2450	$8.16.10^{-7}$	2213.59	1.27
	Ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
	Carrelage	1.50	1.30	0.84	2300	$6.73.10^{-7}$	1584.80	0.42
Plancher bas	Ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
	Hourdis	16.00	1.18	1.00	1372	$8.57.10^{-7}$	1270.32	3.98
	Béton	4.00	2.00	1.00	2450	$8.16.10^{-7}$	2213.59	1.02
	Ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
Plancher intermédiaire	Plâtre	1.50	0.56	1.00	1350	$4.15.10^{-7}$	869.48	0.54
	Hourdis	16.00	1.18	1.00	1372	$8.57.10^{-7}$	1270.32	3.98
	Béton	4.00	2.00	1.00	2450	$8.16.10^{-7}$	2213.59	1.02
	Ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
Mur intérieur	Ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
	Bloc de béton 6 trous	12.00	0.56	0.83	768	$8.77.10^{-7}$	596.93	2.95
	Ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
Vitrage	FLOAT_19		$U_g = 5.16 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$, SHGC = 0.68 and WWR = 24% [52]					

3.2.3.1.3.2 Gains de chaleur internes

Le Tableau 3.4 montre les charges internes du bâtiment [277], qui représentent une source de gain de chaleur en hiver et une charge en été. Par ailleurs, la consommation énergétique journalière peut être estimée en utilisant l'Eq. (3.5) à 24 kWh.jour^{-1} .

$$E_d = \sum_{i=0}^{i=l} P_i t_i \quad l \in N_{num} = [0, 1, \dots, l] ; N_{num} \in \mathbb{N} \quad \text{Eq. (3.5)}$$

Où E_d est la consommation électrique journalière en $[\text{Wh.jour}^{-1}]$, P_i est la puissance électrique absorbée en $[\text{W}]$ et t_i est le temps de fonctionnement en $[\text{heure}]$.

Tableau 3.4. Gains de chaleur internes.

Niveau	Zone	Désignation	Conditionnement	Type de gain	Nombre	Planning journalier	Gains de chaleur
Rez-de-chaussée	1	Salon	Contrôlé	Éclairage		19-22h	5W.m ⁻²
				TV	1	12-14h et 18-20h	100W
				Conditionnement d'air	1	19-22h	120W
				Occupants	4	07-8 h, 12-14 h et 18-20 h (Assis au repos)	60W.Pers ⁻¹
	2	Séjour	Contrôlé	Éclairage		19-22h	5W.m ⁻²
				Conditionnement d'air	1	19-22h	120W
				Occupants	4	07-8 h, 12-14 h et 18-20 h (Assis au repos)	60W.Pers ⁻¹
	3	Salon européen	Contrôlé	Éclairage		19-22h	5W.m ⁻²
				TV	1	12-14h et 18-20h	100W
				Conditionnement d'air	1	19-22h	120W
				Occupants	4	07-8 h, 12-14 h et 18-20 h (Assis au repos)	60W.Pers ⁻¹
	4	Cuisine	Non contrôlé	Éclairage		18-22h	5W.m ⁻²
				Réfrigérateur	1	24h	300W
				Four encastré	1	18-19h (Une fois par semaine)	2500W
				Machine à laver	1	18-19h (Deux fois par semaine)	1500W
	5	WC	Non contrôlé	Éclairage		18-22h	5W.m ⁻²
6	Suite parentale	Contrôlé	Éclairage		20-22h	5W.m ⁻²	
			Ordinateur portable	2	20-22h	50W.PC ⁻¹	
			Conditionnement d'air	1	20-22h	120W	
			Occupants	2	20-22h (Repos)	60W.Pers ⁻¹	
7	WC	Non contrôlé	Éclairage		18-22h	5W.m ⁻²	
8	Dressing	Non contrôlé	Éclairage		19-22h	5W.m ⁻²	
Premier étage	9	Séjour	Contrôlé	Éclairage		19-22h	5W.m ⁻²
				Conditionnement d'air	1	19-22h	120W
				Occupants	4	07-8 h, 12-14 h et 18-20 h (Assis au repos)	60W.Pers ⁻¹
	10	Chambre 1	Contrôlé	Éclairage		20-22h	5W.m ⁻²
				Ordinateur portable	1	20-22h	50W.PC ⁻¹
				Conditionnement d'air	1	20-22h	120W
				Occupants	1	20-22h (Repos)	60W.Pers ⁻¹
				WC	Non contrôlé	Éclairage	
	12	Dressing	Non contrôlé	Éclairage		19-22h	5W.m ⁻²
				Éclairage		20-22h	5W.m ⁻²
13	Chambre 2	Contrôlé	Ordinateur portable	1	20-22h	50W.PC ⁻¹	
			Conditionnement d'air	1	20-22h	120W	
			Occupants	1	20-22h (Repos)	60W.Pers ⁻¹	

3.2.3.1.3.3 Conditions de conditionnement d'air

Les hypothèses de calcul pour le conditionnement d'air prises en compte lors de la simulation sont présentées dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5. Conditions de conditionnement d'air.

Ventilation naturelle dans toutes les zones [v.h ⁻¹]	Ventilation naturelle dans la cuisine [v.h ⁻¹]	Infiltration [v.h ⁻¹]	Température de consigne été [°C]	Température de consigne hiver [°C]
1	5	0.1	26	20

3.2.3.1.3.4 Données météorologiques

Les besoins énergétiques du bâtiment, en particulier ceux liés au chauffage et à la climatisation, varient considérablement avec les écarts de température, surtout en période hivernale. Cet écart devient moins important en période estivale et a donc moins d'influence sur les besoins en climatisation qui sont principalement liés aux gains solaires et aux gains internes. Il est donc nécessaire de quantifier et d'analyser les paramètres météorologiques qui agissent sur les besoins énergétiques.

Comme présenté précédemment, le Maroc a été subdivisé en six zones climatiques. La Figure 3.6 montre la température extérieure annuelle (maximale et minimale) pour ces zones.

La température extérieure à Agadir se situe généralement entre 15 et 25°C. Cela prouve que le climat de cette ville est plutôt confortable. Des pics de chaleur sont observés à certains jours en été. A Tanger, les pics de chaleur sont moins présents et l'hiver est légèrement plus froid qu'à Agadir. Le climat modéré de ces deux villes est justifié par la forte humidité de l'air due à la proximité de la mer Méditerranéenne et de l'océan Atlantique à Tanger et de l'océan Atlantique à Agadir.

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

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

Quant à la ville d'Errachidia, elle se caractérise par une forte amplitude thermique. En hiver et en mi-saison, la température peut varier de 4 à 24°C dans la même journée. En été, la température est souvent supérieure à 26°C. Ces caractéristiques sont principalement dues à sa position qui se situe entre le Haut Atlas et le Sahara.

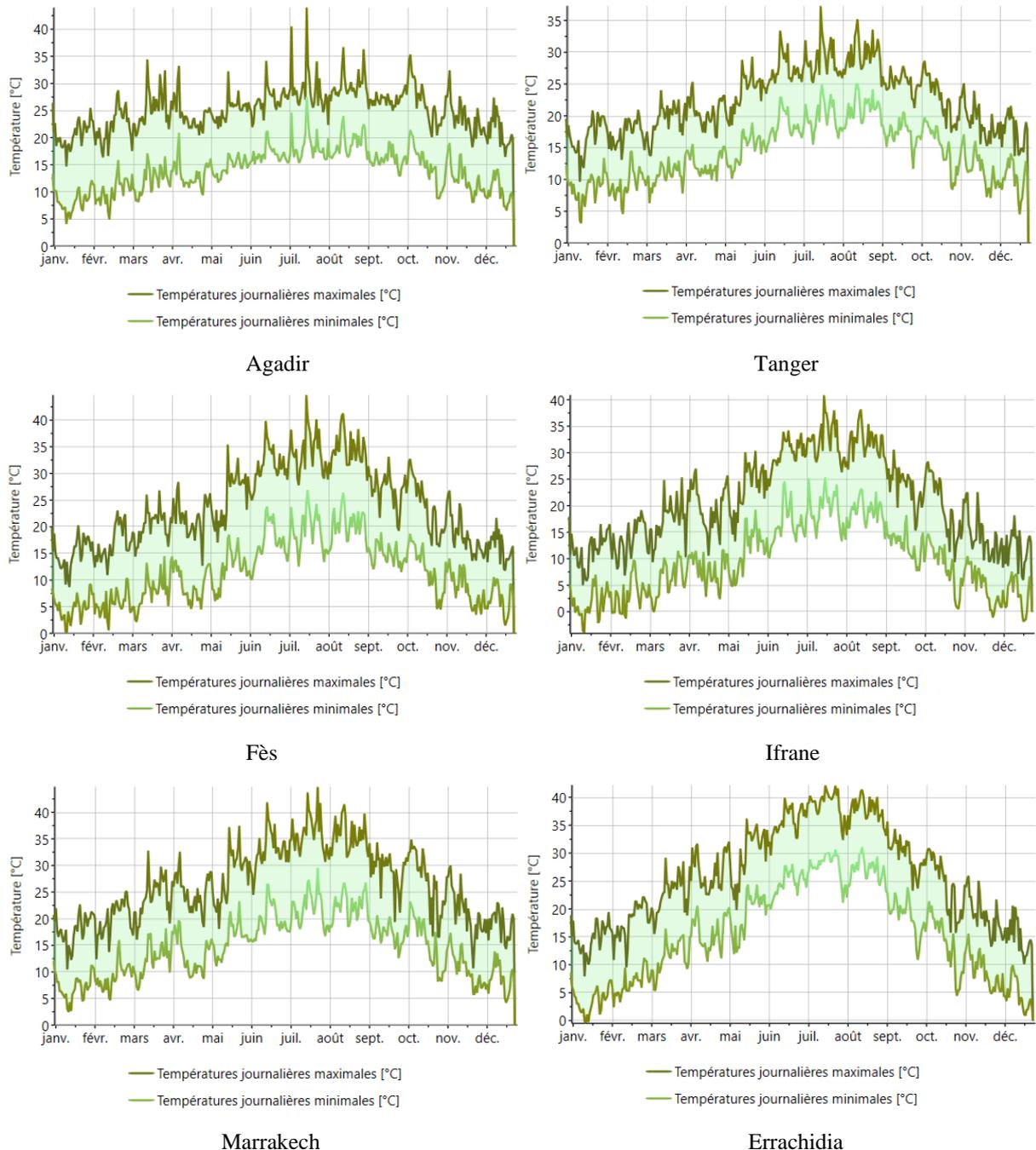


Figure 3.6. Variation de la température extérieure (maximale et minimale) pendant une année pour les six zones climatiques du Maroc.

La Figure 3.7 présente les fréquences cumulées de la température de l'air extérieur pour les six zones climatiques représentatives. La température minimale atteinte est de -5.75°C à Ifrane et la température maximale atteinte est de 43.55°C à Marrakech.

Les fichiers TMY2 générés à l'aide du logiciel Meteonorm [278] ont été utilisés dans cette étude pour décrire les caractéristiques climatiques des villes étudiées, dont certaines sont résumées dans le Tableau 3.6.

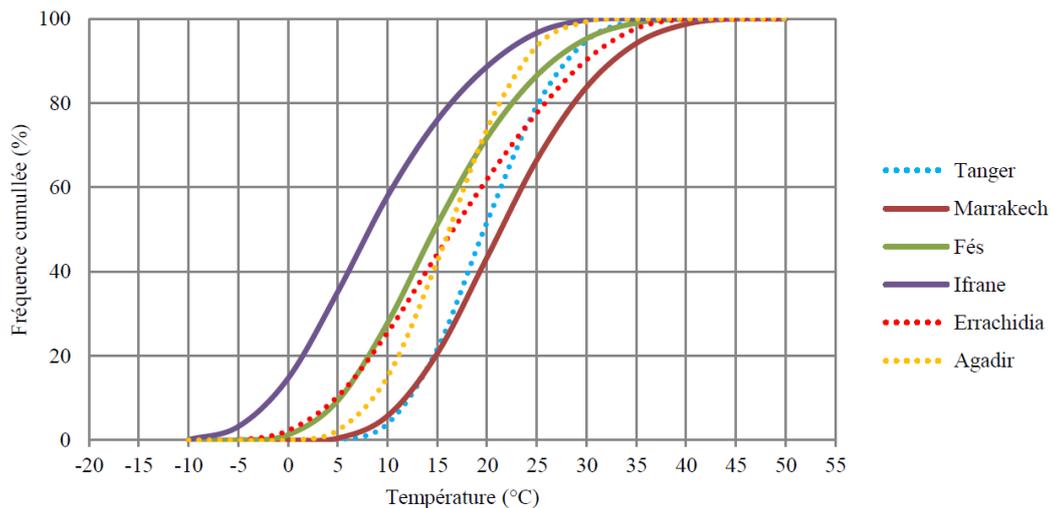


Figure 3.7. Fréquences cumulées annuelles de la température extérieure des zones climatiques étudiées.

Tableau 3.6. Localisation et données météorologiques.

Lieu	Agadir (Maroc)	Tanger (Maroc)	Fès (Maroc)	Ifrane (Maroc)	Marrakech (Maroc)	Errachidia (Maroc)
Latitude	30.4°N	35.7°N	33.9°N	33.5°N	31.6°N	31.9°N
Longitude	-9.6°E	-5.8°E	-5.0°E	-5.2°E	-8.0°E	-4.4°E
Élévation [m]	23	85	579	1665	466	1045
Température mensuelle moyenne la plus élevée [°C]	23.8(Juillet)	24.7(Août)	26.6(Août)	26.1(Juillet)	28.8(Juillet)	33.6(Juillet)
Température mensuelle moyenne la plus basse [°C]	13.7(Janvier)	12.2(Janvier)	9.3(Janvier)	6(Janvier)	11.9(Janvier)	8.5(Janvier)
Degré-jour de chauffage (20°C)	619.13	830.28	1295.28	1901.16	754.24	1034.26
Degré-jour de climatisation (26°C)	549.27	441.37	712.51	516.76	1041.74	1406.72
Rayonnement solaire global horizontal moyen annuel en kWh.m ⁻² .jour ⁻¹	2.015	2.001	1.950	1.968	2.087	2.224
Classification climatique « Köppen »	Bsh (Climat chaud et semi-aride)	Csa (Climat méditerranéen)	Csa (Climat méditerranéen)	Csa (Climat méditerranéen)	Bsh (Climat chaud et semi-aride)	Bwh (Climat chaud et désertique)

3.2.3.2 Développement de modèles de substitution

Aujourd'hui, les outils d'exploration de données représentent une étape importante qui pourrait considérablement renforcer de nombreuses approches permettant de résoudre un problème dans n'importe quel domaine, en particulier celui de la performance des bâtiments. Chou et al [279], affirment dans leur article que parmi les différentes techniques d'exploration de données, la régression par vecteur de support (SVR) et les réseaux neuronaux artificiels (ANNs) sont les plus efficaces, les plus efficaces et les plus précis en termes de prédiction pour modéliser les charges de chauffage et de climatisation pour la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'introduction des ANNs dans les approches visant à améliorer la performance des bâtiments représente une étape importante dans la résolution de la présente problématique, car ils offrent un plus grand degré de précision et de rapidité que les autres techniques conventionnelles. Leur application dans de telles approches demeure donc une idée clé et un développement futur pour les chercheurs [280], [281].

Le rôle des ANNs dans ce travail de recherche est de développer des modèles de substitution, qui seront utilisés pour décrire le comportement dynamique opérationnel des deux fonctions objectif considérées. En effet, les modèles de substitution représentent un axe fondamental et clé pour la présente approche, en raison de leurs avantages potentiels pour l'ensemble des étapes du processus, y compris la conception, la modélisation et l'optimisation [260].

La définition des comportements dynamiques opérationnels des deux fonctions objectif est basée sur la prédiction des ANNs. En effet, la prédiction est une sorte de filtrage dynamique, dans lequel les valeurs passées d'une ou plusieurs séries temporelles sont utilisées pour prédire les valeurs futures. Cette technique a été utilisée dans plusieurs travaux de recherche pour prédire un éventuel besoin dans le secteur du bâtiment [282]–[284].

Dans cette optique et, puisque les prédictions dynamiques nécessitent une base de données de référence, nous avons pu développer une philosophie mathématique pour la création de cette base de données qui ne demande que le minimum possible d'échantillons et donc moins de temps de calcul (voir la dernière colonne de l'Annexe 4). Cette philosophie, qui représente une étape préliminaire importante pour l'apprentissage des réseaux de neurones artificiels, nous permet de construire une base de données suffisamment configurée pour obtenir des modèles de substitution assez robustes tout en garantissant la fiabilité et la rapidité [285], [286].

Pour la mise en œuvre de l'approche proposée, nous allons appliquer chacune de ses étapes sur une étude de cas particulière qui ne sera autre que celle présentée dans la section 3.2.3.1, dans la zone climatique Z5 « Marrakech ».

3.2.3.2.1 Création de la base de données

Comme mentionné ci-dessus, des modèles de substitution, modélisés par l'apprentissage automatique des ANNs, sont utilisés pour représenter les fonctions objectif considérées. Cela implique qu'une base de données est nécessaire pour les définir. En effet, un certain nombre de bases de données a été construit, dont le principe et le nombre de simulations diffèrent d'une base à l'autre. L'objectif est d'identifier quelle base de données a subi un nombre minimum de simulations tout en permettant un apprentissage très précis. Pour ce faire, une approche mathématique a été développée en fonction des critères considérés pour identifier le nombre d'échantillons à simuler, dont la modélisation est présentée de la manière suivante :

$$f_1(X) = ATED(X) \quad \text{Eq. (3.6)}$$

$$f_2(X) = ADH(X) \quad \text{Eq. (3.7)}$$

problème d'optimisation). En effet, ce nombre d'échantillons n'a pas été choisi au hasard, mais plutôt après plusieurs simulations d'évaluation par essais et erreurs. Cette base de données repose sur une philosophie particulière, exprimée dans les lignes suivantes :

Cette philosophie repose sur deux principes fondamentaux qui sont utilisés pour obtenir un apprentissage de haute qualité. Le premier est appelé échantillons de niveau, tandis que le second est appelé échantillons de poids.

- ✓ Les échantillons de niveau : cela signifie que dans chaque simulation d'un échantillon, un seul niveau doit être considéré pour toutes les variables.
- ✓ Les échantillons de poids : cela signifie que dans chaque simulation d'un échantillon, une seule variable doit être isolée, c'est-à-dire que le niveau de celle-ci doit être différent des autres variables dont le niveau, appelé pivot, reste constant. Notez que le niveau 6 est le pivot de reproduction, puisqu'il représente le milieu des niveaux.

Les vecteurs X_1, X_2, \dots, X_{11} représentent les échantillons dits de niveau, c'est-à-dire que dans chaque simulation d'échantillon, un seul niveau doit être pris pour toutes les variables, à l'exception de x_{11} puisqu'elle a 5 niveaux au lieu de 11. Les niveaux de x_{11} sont donc répartis de manière à respecter le principe des autres en simulant chacun deux fois, voire trois fois dans le cas des vecteurs X_9, X_{10}, X_{11} .

Les vecteurs $X_{12}, X_{13}, \dots, X_{35}$ représentent les échantillons dits de poids, c'est-à-dire que dans chaque simulation d'échantillon, une seule variable x_i doit être isolée des autres, dont le niveau varie dans ce cas entre le niveau pivot -1 et +1. La seule exception est x_{11} puisqu'il s'agit d'une variable discrète qui ne possède que 5 niveaux, ce qui n'empêche pas l'ajout de ses deux autres niveaux (X_{32}, X_{35}) afin d'améliorer son apprentissage pondéral. Il faut noter que les X_{34} et X_{35} correspondent au coefficient de compléments β introduit par les variables discrètes (voir Figure 3.8).

Où N_s est le nombre de simulations [-], IN est le nombre d'entrées [-], ns est le coefficient des variables continues [-], Al est le coefficient d'apprentissage automatique [-], β est le coefficient des variables discrètes [-].

Enfin, les différentes simulations nécessaires à la création de la base de données, à travers laquelle l'apprentissage des ANNs sera effectué, sont réalisées comme présenté dans l'Eq. (3.11) :

$$\begin{aligned}
 [f_1, f_2](X_1) &= [\text{ATED}, \text{ADH}](X_1) \\
 [f_1, f_2](X_2) &= [\text{ATED}, \text{ADH}](X_2) \\
 \vdots &= \vdots \\
 \vdots &= \vdots \\
 [f_1, f_2](X_{35}) &= [\text{ATED}, \text{ADH}](X_{35})
 \end{aligned}
 \tag{Eq. (3.11)}$$

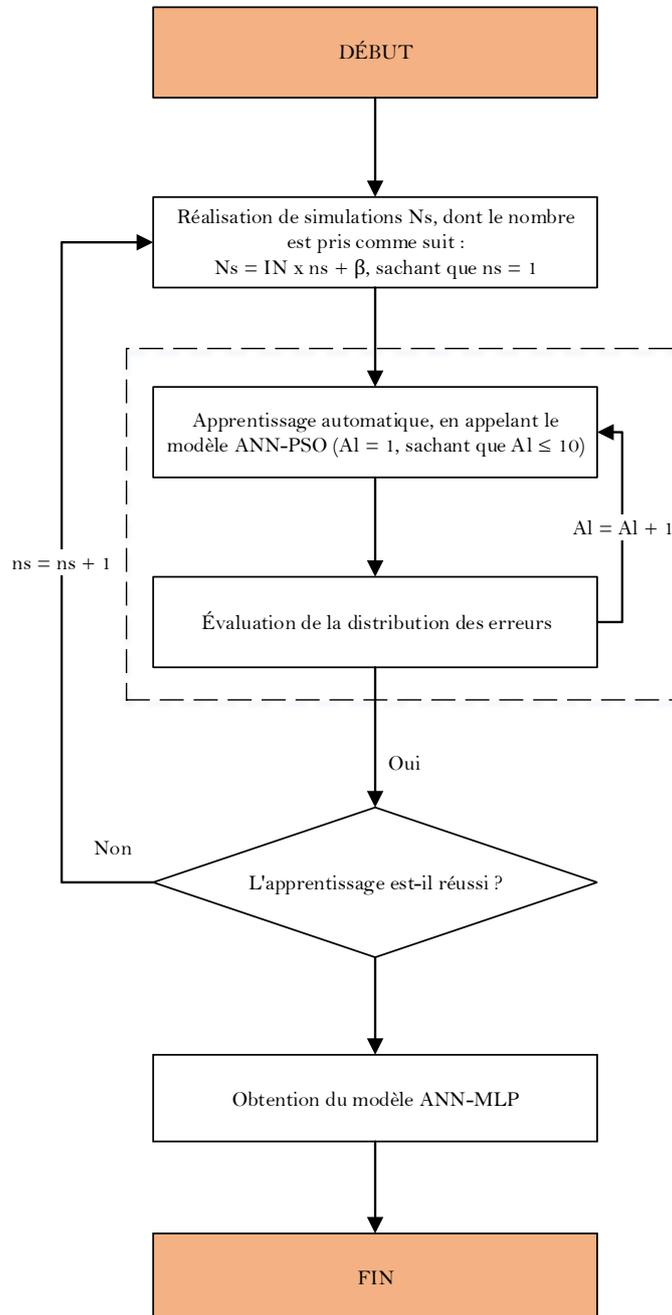


Figure 3.8. Processus d'approbation du nombre de simulations adoptées pour la création de la base de données.

3.2.3.2.2 Apprentissage et validation

Une fois les 35 échantillons simulés à l'aide de la plateforme modélisée dans l'environnement TRNSYS (voir Figure 3.5), on peut procéder à l'étape d'apprentissage et de validation des réseaux de neurones artificiels. Pour ce faire, les 35 échantillons sont divisés aléatoirement en

un ensemble d'apprentissage (70%), un ensemble de validation (15%) et un ensemble de test (15%), comme suggéré par Shahin et al. [287]. En effet, le réseau neuronal multicouche Feed Forward (MFNN) est utilisé en tant que type de ces ANNs, car il représente le type le plus recommandé dans la littérature [288]. Les MFNNs sont des modèles de calcul composés de nombreux neurones (nœuds), qui sont connectés par des liens conjonctifs (poids) et sont disposés couche par couche. La sortie f_i est donc calculée mathématiquement selon l'Eq. (3.12) :

$$f_i = \phi_i \left(\sum_{j=1}^{n_i} w_{i,j} z_{i,j} + b_i \right) \quad \text{Eq. (3.12)}$$

Où $z_{i,j}$ est l'entrée ANN [-], Φ_i est la fonction d'activation ANN [-], $w_{i,j}$ est le poids ANN [-] et b_i est le biais ANN [-].

Les architectures des deux ANNs considérés sont présentées dans la Figure 3.9, où chaque ANN a une couche d'entrée qui contient 11 neurones correspondant aux 11 variables d'optimisation, puis une couche cachée composée de 4 neurones, et enfin une couche de sortie, soit f_1 ou f_2 . Le nombre de neurones dans la couche cachée est indispensable pour assurer la performance du modèle ANN. Un nombre excessif de neurones cachés conduira à un sur-ajustement, tandis qu'un nombre insuffisant de neurones cachés entravera la robustesse et la fiabilité du processus d'apprentissage. En réalité, il n'existe pas de règle générale mais plutôt des règles empiriques. Selon la littérature, la taille de la couche cachée doit être soit égale à celle de la couche d'entrée [289], soit égale à 75% de celle-ci [290], [291], soit égale à la racine carrée du produit du nombre de neurones de la couche d'entrée et de sortie [292]. Dans cette étude, le nombre de neurones cachés a été déterminé en utilisant la méthode d'essai et d'erreur basée sur l'erreur relative moyenne des prédictions des ANNs pour chaque sortie. Le meilleur ajustement a donc été de 4 neurones dans la couche cachée pour chacun des réseaux, ce qui ne correspond à aucune des règles empiriques susmentionnées.

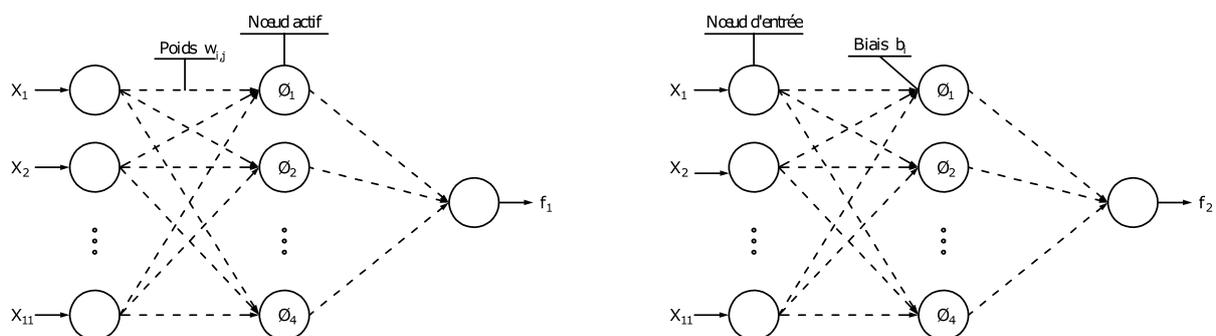


Figure 3.9. Les architectures des deux ANNs à trois couches Feed-Forward pour f_1 et f_2 .

Les réseaux ont été formés à l'aide de l'algorithme de rétro-propagation de Levenberg-Marquardt. Une fonction sigmoïde pour la couche cachée et une fonction linéaire pour la couche de sortie ont été employées comme des fonctions de transfert. Cet apprentissage n'est pas basé sur le principe classique, c'est-à-dire qu'il s'arrête automatiquement lorsque le MSE des échantillons de validation est stabilisé, mais plutôt sur une combinaison particulière avec le PSO comme suggéré par Keshtkarbanaemoghadam et al. [293]. En effet, lorsque les ANNs commencent l'apprentissage, notamment lorsque le processus atteint le MSE classique, le PSO est invité à trouver les poids ($w_{i,j}$) et les biais (b_i) des réseaux neuronaux les plus optimisés par rapport au MSE. Ensuite, après un ensemble d'itérations bien définies, soit 50 dans ce cas, le processus de couplage compare à chaque fois les deux MSE afin d'obtenir finalement le meilleur apprentissage à un MSE très faible. On obtient ainsi les meilleures performances du modèle ANN-MLP (Artificial Neural Network – Multi-Layer Perceptron), comme le montre la Figure 3.10. La sélection de deux réseaux plutôt qu'un seul consiste à définir chaque fonction séparément de l'autre, afin de mieux définir leur comportement thermique et ainsi mieux réaliser l'optimisation.

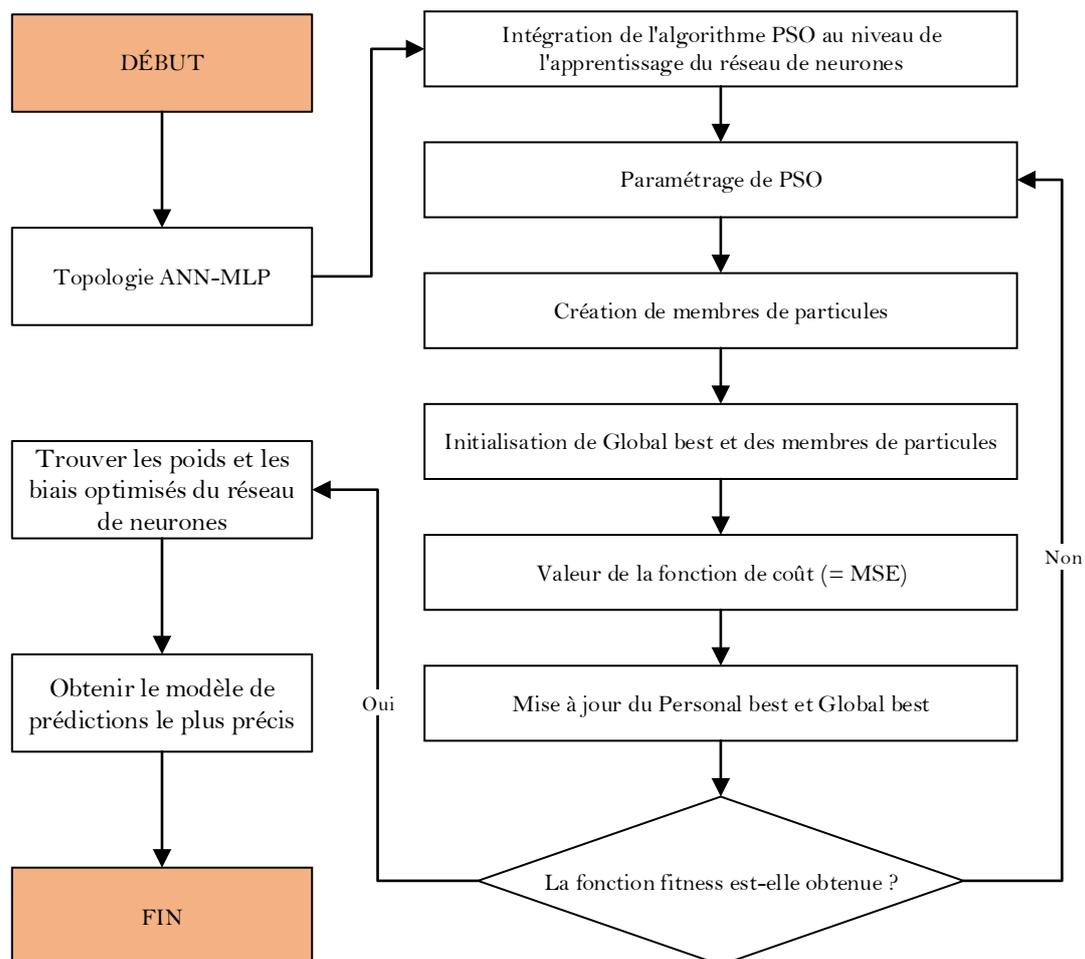


Figure 3.10. Implémentation de l'algorithme PSO dans la phase d'apprentissage des réseaux de neurones.

3.2.3.2.3 Évaluation de la précision

L'évaluation de la précision des modèles de substitution, quelle que soit l'approche adoptée, est indispensable pour obtenir un aperçu concret sur leur fiabilité. Il est donc nécessaire d'évaluer la fiabilité des réseaux développés avant de passer à l'étape d'optimisation.

En effet, les fonctions d'erreur les plus couramment utilisées pour mesurer la précision pendant l'apprentissage des ANNs sont : l'erreur quadratique moyenne (MSE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). En revanche, les métriques préférées pour évaluer la performance des métamodèles, de manière générale, sont bien le RMSE, le coefficient de détermination (R^2) et le coefficient de corrélation (R) [288].

Dans ce travail, cette évaluation est effectuée en utilisant les métriques de la fiabilité prédictive les plus importantes et les plus fréquemment utilisées dans la littérature [288], à savoir RMSE et R^2 . Tout naturellement, le RMSE permet d'avoir une visibilité complète de la distribution des erreurs pour tout type d'évaluation prédictive similaire à celle présentée dans cette étude. En effet, l'évaluation des modèles ANN-MLP à travers ces mesures n'a pas de règle de valeur de référence puisqu'elle dépend absolument du nombre d'observations comme le confirment de nombreux auteurs. Cela signifie qu'un RMSE qui varie autour de 2 pour une évaluation prédictive d'une taille d'observation similaire à celle présentée dans cette étude semble très satisfaisant. Pour pouvoir sélectionner un modèle de substitution ayant une fiabilité significative, 10 simulations ont donc été établies, chacune d'entre elles ayant été soumise à un calcul de RMSE conformément à l'Eq. (2.28).

Après l'établissement de ces simulations, il a été constaté que la distribution des erreurs évolue de manière extensible. Cependant, pour chacun des indicateurs de performance considérés, à savoir ATED et ADH, il apparaît que les valeurs RMSE sont inférieures à 3, ce qui est suffisamment faible pour fournir une bonne prédiction, comme le montrent la Figure 3.11 et la Figure 3.12. Dans ce cas, les modèles ANN-MLP sélectionnés sont ceux qui présentent le RMSE le plus faible, c'est-à-dire $RMSE = 1.12$ et $RMSE = 2.22$ respectivement pour l'ATED et l'ADH. Cela garantit une fiabilité prédictive élevée puisque la corrélation, mesurée par les modèles sélectionnés, entre les prédictions des modèles ANN-MLP et les simulations TRNSYS est proche de 1, ce qui correspond à une très forte corrélation, comme le montrent la Figure 3.13 et la Figure 3.14.

Notons que le coefficient de détermination (R^2), calculé selon l'Eq. (2.26), est en effet le carré du coefficient de corrélation linéaire (R), puisqu'il s'agissait d'une régression linéaire.

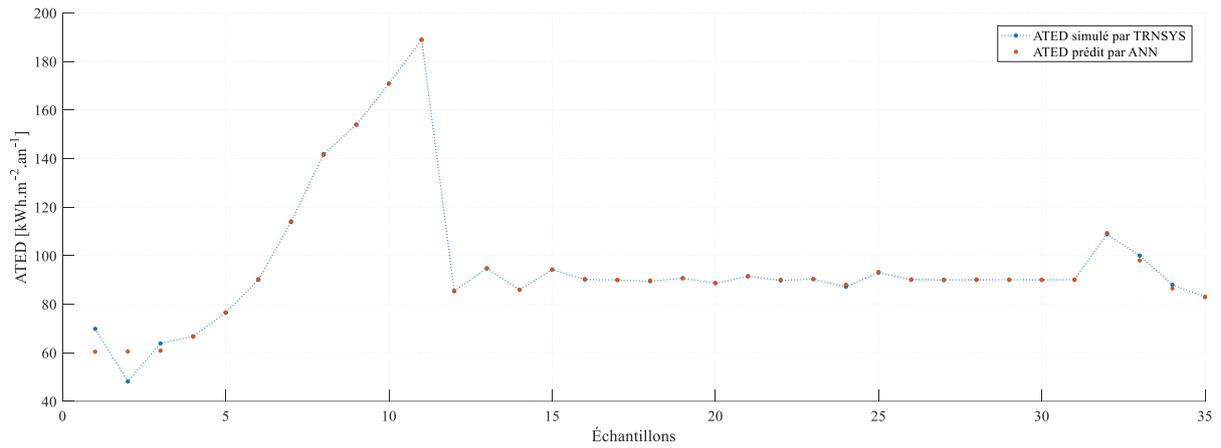


Figure 3.11. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED.

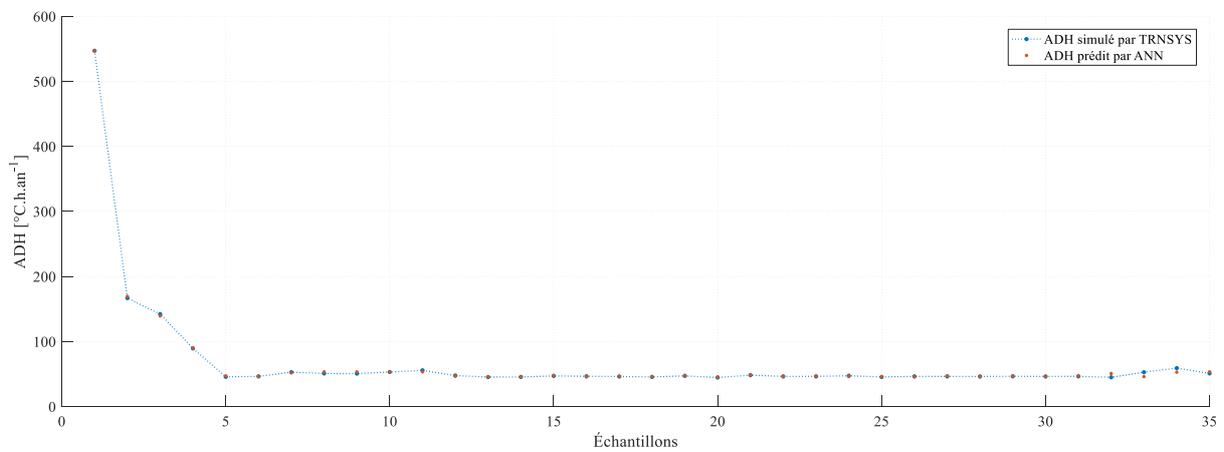


Figure 3.12. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH.

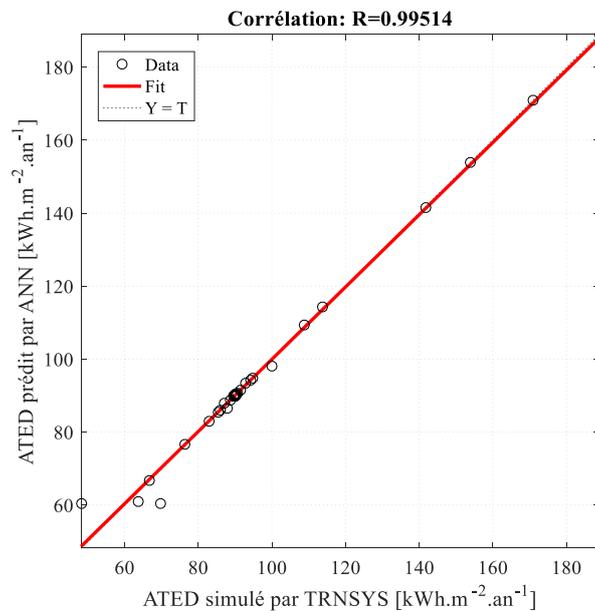


Figure 3.13. La régression entre les prédictions du modèle ANN-MLP et les simulations réalisées par TRNSYS pour l'ATED.

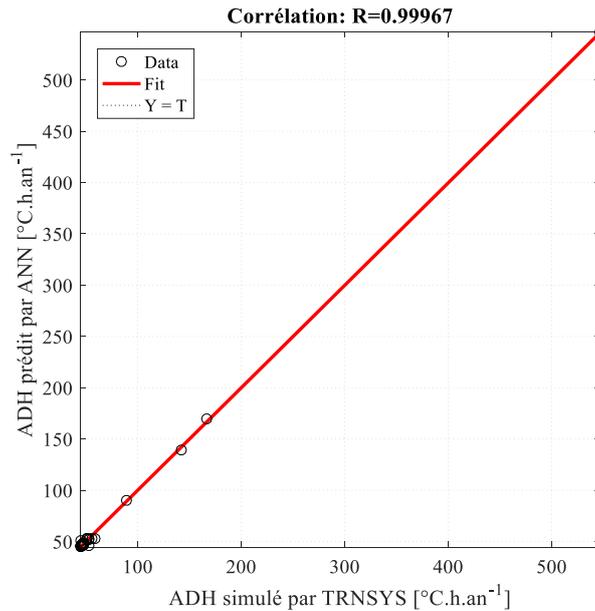


Figure 3.14. La régression entre les prédictions du modèle ANN-MLP et les simulations réalisées par TRNSYS pour l'ADH.

3.2.3.2.4 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à étudier comment les variations des paramètres d'entrée d'un modèle génèrent des variations des paramètres de sortie. Ce type d'analyse permet de mieux comprendre le comportement d'un modèle en étudiant les influences des paramètres d'entrée sur la ou les sorties ciblées. Cette analyse est souvent utilisée sur des modèles de calcul considérés comme des « boîtes noires ». Les résultats d'une analyse de sensibilité peuvent être utilisés pour : identifier les paramètres les plus influents, simplifier les modèles en transformant les paramètres les moins influents en constantes, calibrer la plage de fonctionnement d'un modèle et mieux comprendre les corrélations entre les paramètres.

Dans cette étude, l'analyse de sensibilité du processus d'apprentissage n'a pas vraiment été utilisée aux fins susmentionnées mais plutôt pour démontrer l'impact de la sélection a priori des variables de conception, effectuée sur la base d'une revue de littérature assez importante, sur les fonctions objectif visées. Cela consiste à mesurer l'effet de chaque paramètre d'entrée sur l'ATED et l'ADH en utilisant le fameux algorithme de Garson 1991 [294]. L'objectif de l'utilisation de cet algorithme est d'évaluer l'importance relative de chaque paramètre d'entrée sur la ou les sorties désertées, et ainsi de mieux comprendre les corrélations entre eux. La procédure détaillée de l'algorithme est présentée dans l'Annexe 5.

Certains chercheurs tels que Calleja Rodríguez et al. [295] et Laine et al. [83] ont effectué une analyse de sensibilité à l'aide de différentes méthodes métaheuristiques afin de déterminer l'impact majeur des paramètres d'entrée sur la performance énergétique des bâtiments. Dans

cette étude, l'analyse de sensibilité du modèle de substitution développé est présentée à la Figure 3.15. Cette analyse a été réalisée sur la base de l'algorithme de Garson tel que suggéré par Keshtkarbanaemoghadam et al. [293]. Les résultats montrent que les différents paramètres d'entrée présentent un impact important sur l'ATED et l'ADH, ce qui était déjà escompté lors du choix des paramètres de conception de l'enveloppe. Ainsi, les trois paramètres ayant un impact plus important sur l'ATED par rapport aux autres sont : le coefficient de transmission des murs extérieurs (18.77%), le coefficient de transmission de la toiture (11.80%) et le renouvellement d'air horaire (10.13%). En revanche, pour l'ADH, le renouvellement d'air horaire arrive en tête de liste (11.99%), suivi du coefficient de transmission du plancher (11.25%) et enfin du vitrage (10.97%).

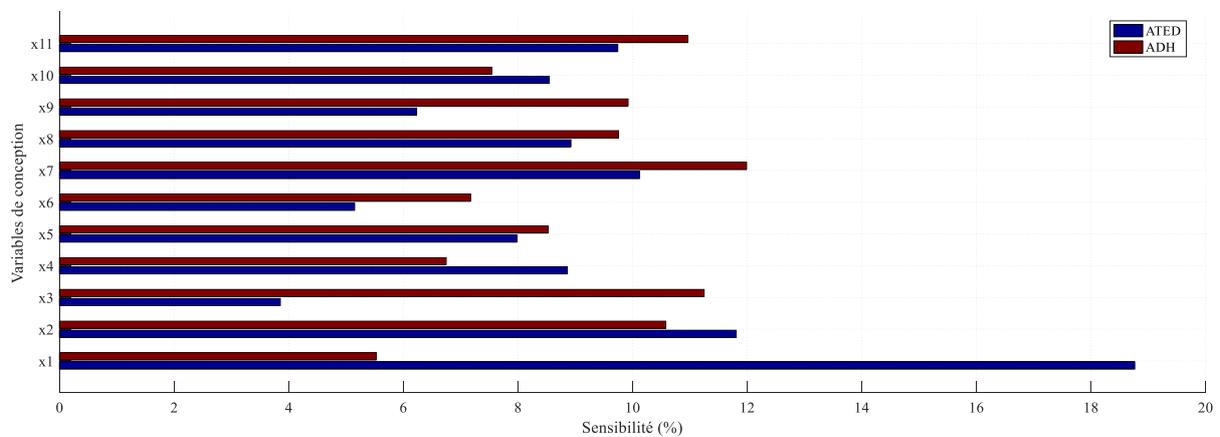


Figure 3.15. L'importance relative de chaque variable d'entrée pour l'estimation de l'ATED et de l'ADH.

3.2.4 Optimisation

L'optimisation est généralement définie comme la sélection du meilleur candidat parmi un ensemble d'alternatives disponibles en fonction de certains critères. Pour cela, une technique d'optimisation adaptée au problème considéré doit être employée. Dans cette étude, le problème d'optimisation consiste à minimiser les deux fonctions (f_1 , f_2) définies par l'Eq. (3.1) et l'Eq. (3.2), tel que décrit mathématiquement par l'Eq. (3.3), sous la contrainte présentée par l'Eq. (3.4).

3.2.4.1 Choix de l'algorithme approprié

3.2.4.1.1 Paramétrage

Pour la sélection de la technique d'optimisation la plus appropriée au présent problème d'optimisation, nous nous sommes référés au corpus de connaissances existant dans cet axe de recherche, notamment celui présenté dans l'Annexe 3-A et l'Annexe 3-B et l'Annexe 4. Il ressort de cette revue de littérature qu'un certain nombre d'algorithmes d'optimisation métaheuristiques ont été utilisés dans différents contextes, impliquant différents paramètres et des approches visiblement différentes, bien que certains d'entre eux soient fréquemment reproduits, notamment les algorithmes évolutionnaires et ceux basés sur les essaims de particules. Ces derniers ont été comparés les uns aux autres dans de nombreux travaux de recherche [296]–[298]. En outre, Nguyen et al. [87] ont montré dans une revue très détaillée des méthodes d'optimisation basées sur la simulation appliquées à l'analyse de la performance des bâtiments que, selon 200 articles publiés dans cet axe de recherche, les algorithmes génétiques se classent au premier rang en termes d'utilisation, suivis des algorithmes PSO et enfin des algorithmes hybrides. À cet égard, compte tenu du rang d'utilisation des algorithmes génétiques et de ceux basés sur les essaims de particules, trois algorithmes d'optimisation stochastique basés sur la population, à savoir NSGA-II [242], MOGA [299] et MOPSO [300], ont été sélectionnés pour être appliqués au présent problème d'optimisation. Tous ces algorithmes ont été implémentés sur Matlab R2016a conformément à leur principe de fonctionnement décrit dans la section 2.2.3.2.3.

Il est bien connu que la performance des algorithmes d'optimisation ne dépend pas seulement du problème d'optimisation mais aussi des paramètres de contrôle. Dans cette étude, les paramètres de chaque algorithme d'optimisation ont été définis en fonction des paramètres de référence choisis par Li et al. [190] (voir Tableau 3.7). A l'exception de la taille de la population et du nombre d'itérations, dans la mesure où ces paramètres possèdent un impact important sur la convergence de ces algorithmes. En effet, plusieurs tests ont été effectués pour définir l'intervalle dans lequel les optimums désirés sont fréquemment trouvés, en considérant de manière privilégiée la taille de la population, le nombre d'itérations et le temps de simulation. Ces tests montrent que cet intervalle est compris entre 25 et 100, tant pour la taille de la population que pour le nombre d'itérations, à condition que leur produit soit le même tout au long de l'intervalle. La plus grande convergence conduisant à une meilleure solution a donc été évaluée selon 4 tests comme indiqué dans le Tableau 3.8, dans le même intervalle, afin de pouvoir sélectionner l'algorithme approprié.

Tableau 3.7. Paramétrage des algorithmes d'optimisation appliqués.

Algorithmes	Paramètres	Valeurs
NSGA-II	Nombre d'itérations	25-100
	Taille de la population	25-100
	Probabilité de crossover	0.9
	Probabilité de mutation	0.5
MOPSO	Nombre d'itérations	25-100
	Taille de la population	25-100
	Coefficient d'accélération c_1	2
	Coefficient d'accélération c_2	2
	Poids d'inertie w	0.4
MOGA	Taux d'amortissement w_{damp}	0.9
	Nombre d'itérations	25-100
	Taille de la population	25-100
	Probabilité de crossover	0.9
	Probabilité de mutation	0.5

Tableau 3.8. Paramétrage du nombre d'itérations et de la taille de la population pour les quatre tests.

Paramètres	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Nombre d'itérations	100	75	50	25
Taille de la population	25	50	75	100

3.2.4.1.2 Application et sélection

La sélection d'un algorithme approprié, parmi un ensemble d'algorithmes, pour un problème d'optimisation donné est basée sur l'évaluation de sa performance par rapport à des critères dépendant principalement de l'objectif visé. Comme présenté dans la section 2.2.3.2.3.1, le front de Pareto est une notion importante dans le contexte de l'optimisation multi-objectif, soit, par définition, un ensemble de solutions qui ne sont pas dominées les unes par les autres [243] (c'est-à-dire qu'aucun objectif de conception ne peut être amélioré sans juger au préalable les autres).

En effet, la mesure de la performance d'un algorithme multi-objectif dépend de l'évaluation des propriétés de l'ensemble de Pareto optimal, estimé par cet algorithme, ainsi que des capacités de calcul nécessaires pour le générer. Ces propriétés sont diverses, notamment la diversité, la distance générationnelle, la distance générationnelle inversée normalisée, etc. [301], [302]. Dans cette étude, la mise en application d'un algorithme d'optimisation vise, d'une manière générale, à répondre à la présente problématique tout en veillant à garantir un temps de calcul minimal, ce qui est partiellement pris en compte lors de la définition de la plage de tests présentée dans le Tableau 3.8. En complément, trois critères ont été mis en exergue afin de pouvoir sélectionner l'algorithme approprié, notamment l'optimalité, la diversité des solutions et le temps de calcul.

La Figure 3.16, la Figure 3.17 et la Figure 3.18 montrent le spectre Pareto-optimal des différents algorithmes d'optimisation appliqués, soit respectivement le NSGA-II, le MOPSO et le MOGA. Il convient de noter que ce spectre Pareto-optimal représente les optimums par rapport à l'espace des objectifs plutôt qu'à l'espace de décision, puisque la raison la plus importante d'utiliser des algorithmes multi-objectif est la recherche d'un éventuel compromis entre des objectifs contradictoires. Ces chiffres peuvent être mieux compris en examinant le Tableau 3.9, qui montre les trois meilleures solutions Pareto-optimales obtenues par chaque algorithme considéré dans les quatre tests proposés :

- Tout d'abord, le temps de calcul constitue le critère principal de cette étude. Le MOPSO a donc pu montrer qu'il pouvait vaincre les autres algorithmes en ce qui concerne le moment où la convergence est parfaitement atteinte. En revanche, cette surperformance ne peut être utile que si les autres critères d'évaluation sont semblables pour tous les algorithmes considérés, car ce dernier ne représente pas un temps de réponse très important (voir Tableau 3.10).
- Quant à l'optimalité, qui est un critère de base pour toutes les études visant à optimiser un besoin quelconque, il s'avère que chacun de NSGA-II et de MOPSO ont réussi, au terme de leur convergence, à fournir des solutions Pareto-optimales bien optimisées par rapport à celles obtenues par le MOGA (c'est-à-dire les meilleures solutions Pareto-optimales réalisables dans le plan objectif). Ces solutions sont pratiquement identiques dans tous les tests proposés. De plus, leur propriété particulière en termes de proximité des solutions Pareto-optimales devient plus importante lorsque le nombre d'itérations augmente.
- Enfin, le troisième critère, qui est la diversité, sert à offrir aux décideurs une option multiple en termes de solutions Pareto-optimales, afin de fournir une flexibilité suffisante dans le cas où il existe des contraintes relatives à certains facteurs, à savoir la faisabilité, la disponibilité, le coût, etc. En effet, tous les algorithmes mis en application, i. e. NSGA-II, MOPSO et MOGA ont montré dans chacun des 4 tests qu'ils peuvent générer des solutions Pareto-optimales distinctes, mais de manière assez limitée.

L'analyse comparative permet enfin de montrer que le NSGA-II et le MOPSO présentent les algorithmes les plus performants par rapport au MOGA, en termes de balance entre les critères considérés. L'algorithme MOPSO est toutefois celui qui est retenu car il offre un certain avantage en temps de calcul par rapport au NSGA-II.

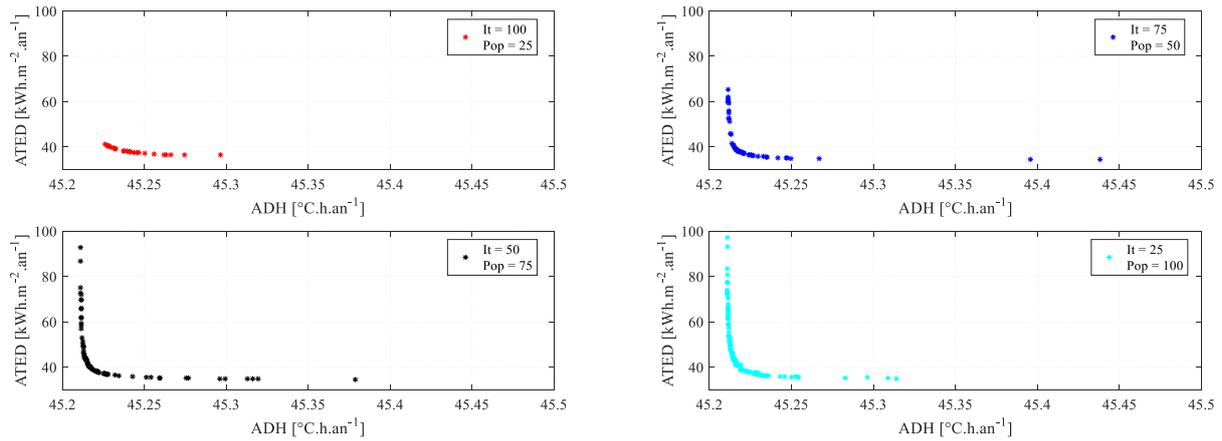


Figure 3.16. Evolution des frontières de Pareto en 4 tests pour le NSGA-II.

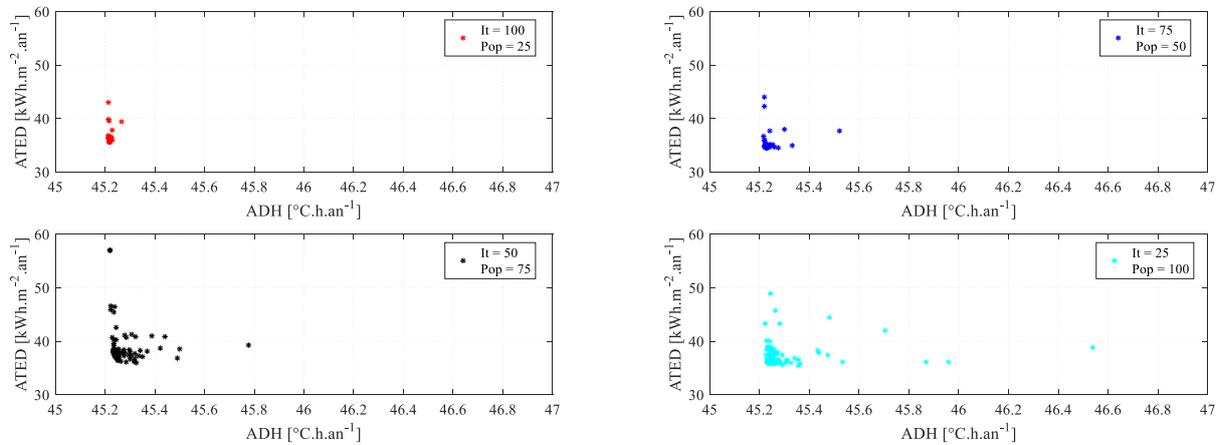


Figure 3.17. Evolution des frontières de Pareto en 4 tests pour le MOPSO.

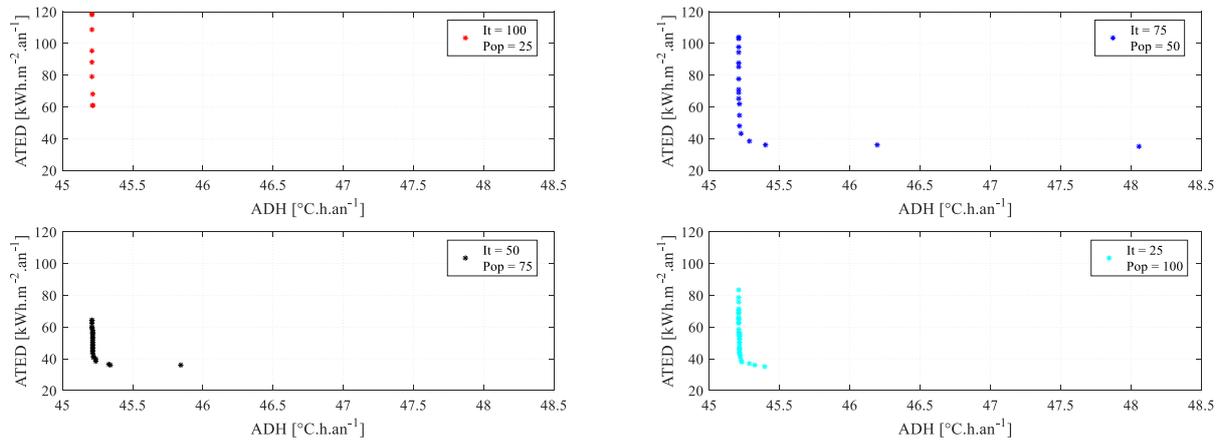


Figure 3.18. Evolution des frontières de Pareto en 4 tests pour le MOGA.

Il faut noter que, dans cette étude, seul le spectre qui répond au plan des objectifs est concerné.

Tableau 3.9. Les trois meilleures solutions Pareto-optimales obtenues par chaque algorithme sur les quatre tests.

Algorithme	Test	Top 3 POS	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	ATED	ADH
NSGA-II	1	1	0.45	0.41	2.17	0.48	0.10	0.50	0.54	0.46	0.55	0.54	Glz4	36.40	45.30
		2	0.27	0.70	2.14	0.49	0.10	0.50	0.53	0.46	0.55	0.53	Glz4	36.42	45.27
		3	0.34	0.62	2.13	0.49	0.10	0.49	0.52	0.46	0.54	0.53	Glz4	36.47	45.27
	2	1	0.18	0.16	2.82	0.37	0.11	0.26	0.30	0.41	0.38	0.72	Glz4 - Glz5	34.51	45.44
		2	0.18	0.16	2.82	0.43	0.11	0.26	0.30	0.41	0.38	0.72	Glz4 - Glz5	34.59	45.40
		3	0.23	0.37	2.55	0.36	0.10	0.26	0.30	0.39	0.58	0.75	Glz4 - Glz5	34.89	45.27
	3	1	0.40	0.28	2.46	0.37	0.10	0.51	0.11	0.39	0.45	0.54	Glz5	34.69	45.38
		2	0.40	0.28	2.46	0.37	0.10	0.51	0.29	0.39	0.45	0.54	Glz5	34.72	45.32
		3	0.40	0.28	2.46	0.37	0.10	0.51	0.29	0.40	0.45	0.54	Glz5	34.73	45.32
	4	1	0.12	0.37	2.27	0.41	0.11	0.24	0.52	0.72	0.37	0.76	Glz4 - Glz5	34.95	45.31
		2	0.13	0.42	2.38	0.34	0.11	0.22	0.51	0.75	0.41	0.75	Glz4	35.09	45.28
		3	0.11	0.51	2.19	0.40	0.10	0.17	0.59	0.75	0.44	0.76	Glz3 - Glz4	35.48	45.25
MOPSO	1	1	0.51	0.34	2.73	0.10	0.10	0.09	0.44	0.77	0.64	0.97	Glz3 - Glz5	35.58	45.22
		2	0.56	0.21	2.90	0.10	0.10	0.11	0.50	0.82	0.64	0.95	Glz4	35.63	45.22
		3	0.53	0.24	2.68	0.10	0.10	0.13	0.53	0.77	0.65	1.00	Glz4	35.72	45.22
	2	1	0.14	0.10	2.81	0.10	0.10	0.04	0.41	0.55	0.65	1.00	Glz4	34.53	45.27
		2	0.18	0.19	2.90	0.11	0.10	0.06	0.28	0.52	0.76	0.95	Glz4	34.55	45.23
		3	0.12	0.22	2.83	0.10	0.10	0.05	0.40	0.57	0.78	0.97	Glz4 - Glz5	34.56	45.23
	3	1	0.36	0.59	2.44	0.29	0.10	0.37	0.56	0.53	0.50	0.50	Glz4	35.93	45.33
		2	0.24	0.85	2.25	0.40	0.10	0.42	0.55	0.50	0.47	0.52	Glz4 - Glz5	36.17	45.28
		3	0.36	0.52	1.96	0.35	0.10	0.41	0.42	0.54	0.53	0.52	Glz4	36.20	45.32
	4	1	0.23	0.25	2.25	0.50	0.10	0.44	0.58	0.51	0.57	0.58	Glz4	35.40	45.36
		2	0.41	0.22	2.37	0.46	0.10	0.43	0.44	0.59	0.40	0.71	Glz4	35.58	45.29
		3	0.32	0.31	2.51	0.40	0.10	0.37	0.53	0.61	0.54	0.72	Glz3 - Glz4	35.71	45.26
MOGA	1	1	1.20	0.76	1.99	0.34	0.16	0.37	0.65	0.62	0.57	0.73	Glz3 - Glz4	61.09	45.22
		2	1.20	1.04	1.99	0.32	0.16	0.37	0.62	0.62	0.58	0.73	Glz3 - Glz4	68.32	45.21
		3	1.30	1.20	1.99	0.27	0.16	0.37	0.67	0.63	0.59	0.73	Glz3 - Glz4	79.27	45.21
	2	1	0.45	0.63	2.57	0.51	0.31	0.41	0.22	0.24	0.35	0.54	Glz4	35.98	46.19
		2	0.43	0.57	2.36	0.51	0.22	0.39	0.28	0.30	0.46	0.61	Glz4	36.16	45.40
		3	0.42	0.78	2.55	0.51	0.14	0.42	0.58	0.58	0.35	0.64	Glz3 - Glz4	38.56	45.28
	3	1	0.18	0.51	2.55	0.39	0.18	0.38	0.63	0.56	0.58	0.64	Glz4	36.15	45.34
		2	0.13	0.50	2.71	0.42	0.23	0.38	0.60	0.56	0.59	0.57	Glz4	35.83	45.84
		3	0.30	0.60	2.44	0.41	0.19	0.38	0.64	0.56	0.59	0.61	Glz4	36.71	45.33
	4	1	0.32	0.51	2.39	0.27	0.22	0.26	0.42	0.69	0.36	0.65	Glz4 - Glz5	35.28	45.40
		2	0.46	0.51	2.40	0.21	0.22	0.38	0.49	0.69	0.48	0.57	Glz4 - Glz5	35.86	45.33
		3	0.51	0.51	2.40	0.24	0.22	0.34	0.49	0.75	0.58	0.62	Glz4	36.75	45.28

Notez que la composition [Glz_j - Glz_{j+1}] signifie que cette variable correspond au milieu des deux frontières.

Tableau 3.10. Les particularités du temps de calcul des algorithmes proposés dans les quatre tests.

Caractéristiques	NSGA-II			MOPSO			MOGA					
Tests	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4		
Temps de calcul (s)	58	98	107	66	38	62	64	42	41	60	68	49
Temps de convergence (s)	7	32	79	54	29	40	10	26	5	20	50	40
Efficacité (%)	99.99	99.99	99.95	99.99	99.93	99.96	99.99	99.98	98.18	99.14	99.06	98.54

3.2.4.2 Solutions obtenues

Il est bien connu que la technique d'optimisation des performances des bâtiments permet d'obtenir des gains importants au terme de son application. Dans cette étude, elle a conduit à une amélioration significative de la performance énergétique, en particulier celle liée au chauffage et à la climatisation, ainsi qu'au confort thermique intérieur, d'un bâtiment résidentiel situé dans la région de Marrakech. En effet, le bâtiment de référence est basé sur des hypothèses portant sur les mêmes caractéristiques qu'un bâtiment construit avant 2014 dans la même région, lorsque le RTCM n'était pas encore obligatoire. Il ne s'agit donc pas d'un bâtiment monitoré, c'est-à-dire qu'il ne dispose pas d'un système de gestion de l'énergie et de données. À cet égard, ses performances optimisées ne peuvent être comparées qu'aux recommandations du

RTCM, puisqu'il représente le code thermique de la construction au Maroc, comme décrit dans la section 1.3.2.

En effet, le RTCM ne dispose pas de recommandations spécifiques concernant le confort thermique, à l'exception des températures de consigne, ce qui implique que l'ADH optimisé dans cette étude ne peut être comparé qu'à celle du bâtiment de base. En revanche, un indicateur de performance thermique, notamment en ce qui concerne le chauffage et le refroidissement, est vivement recommandé pour une telle région, à savoir $130 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ comme limite supérieure à ne pas dépasser.

3.2.4.2.1 Conception optimale

D'après la section 3.2.4.1.2, l'application des différents algorithmes d'optimisation utilisés dans cette étude a montré que le MOPSO est le plus approprié pour traiter le présent problème d'optimisation. A cet égard, quatre solutions ont été sélectionnées parmi les différentes alternatives proposées par le MOPSO, c'est-à-dire une solution de chacun des quatre tests, afin de construire les solutions les plus efficaces telles que présentées dans le Tableau 3.11. Ce tableau montre que chaque solution présente une certaine diversité par rapport aux autres, en termes de variables de conception, à l'exception de la variable x_5 , qui est constante dans toutes les solutions proposées. La raison en est que le toit constitue un élément critique qui doit être considéré avec une certaine prudence par rapport aux autres parois opaques, afin de limiter au maximum les pertes de chaleur. Par ailleurs, il faut noter que la variable x_{11} est également importante, puisqu'elle représente la partie vitrée de l'enveloppe du bâtiment. C'est pourquoi elle varie entre les vitrages les plus performants proposés dans cette étude.

Tableau 3.11. Variables de conception des quatre solutions retenues.

Variable de conception	Unité	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
Coefficient de transmission des murs extérieurs	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	0.51	0.14	0.36	0.23
Coefficient de transmission du toit	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	0.34	0.10	0.59	0.25
Coefficient de transmission du plancher	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	2.73	2.81	2.44	2.25
Coefficient d'absorption des murs extérieurs	-	0.10	0.10	0.29	0.50
Coefficient d'absorption du toit	-	0.10	0.10	0.10	0.10
Coefficient linéaire des ponts thermiques	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	0.09	0.04	0.37	0.44
Renouvellement d'air par heure	v.h^{-1}	0.44	0.41	0.56	0.58
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers le Nord	-	0.77	0.55	0.53	0.51
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers le Sud	-	0.64	0.65	0.50	0.57
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers l'Est	-	0.97	1.00	0.50	0.58
Vitrage	-	Glz ₄ - Glz ₅	Glz ₄	Glz ₄	Glz ₄

3.2.4.2.2 Potentiel d'amélioration

Suite à la sélection des quatre solutions présentées dans la section précédente, il ressort du Tableau 3.11 qu'elles représentent des solutions appropriées pour cette étude, en raison des performances obtenues tant pour l'ATED que pour l'ADH. En conséquence, dans le cas où une seule solution devrait être retenue, ce sera la solution 2, bien qu'elle ne présente qu'une légère différence d'avantage, qui semble négligeable par rapport aux autres. Cette solution permet au bâtiment étudié d'être en totale conformité avec le RTCM puisque l'ATED varie autour de 35 kWh.m⁻².an⁻¹, ce qui représente environ 4 fois moins que la limite supérieure réglementaire. De plus, l'ADH a été pratiquement amélioré grâce à une réduction d'environ 2 °C.h.an⁻¹ par rapport au bâtiment de référence, ce qui demeure une amélioration concomitante de sa performance thermique.

Dans cette étude, la solution 2, utilisant l'Eq. (3.13), a apporté un potentiel très important d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment, notamment en termes de besoins thermiques (voir Tableau 3.12). Ce potentiel peut être chiffré par une moyenne de 74.52%, ce qui signifie que les économies en matière de consommation d'énergie des systèmes de conditionnement d'air représentent plus que la moitié du total. De plus, une amélioration supplémentaire de 4.32% du confort thermique a été obtenue pour les occupants.

$$I_p (\%) = \frac{f_{OD} - f_{BD}}{f_{BD}} \quad \text{Eq. (3.13)}$$

Où I_p est le potentiel d'amélioration en [%], f_{BD} est la valeur de l'indicateur de performance de la conception de base [-], f_{OD} est la valeur de l'indicateur de performance de la conception optimisée [-]. Notez que le potentiel d'amélioration (I_p) ne peut être calculé que si le f_{OD} et le f_{BD} ont la même unité.

Tableau 3.12. Potentiel d'amélioration des quatre solutions retenues par rapport à la conception de base.

Conception du bâtiment	Fonction objectif	Valeur	Potentiel d'amélioration (%)
Base	ATED	135.50	-
	ADH	47.32	-
Solution 1	ATED	35.58	73.74
	ADH	45.22	4.44
Solution 2	ATED	34.53	74.52
	ADH	45.27	4.32
Solution 3	ATED	35.93	73.48
	ADH	45.33	4.22
Solution 4	ATED	35.40	73.87
	ADH	45.36	4.15

3.3 Application sur 6 zones climatiques

Afin de vérifier la stationnarité et la régularité de la méthode proposée (soit l'étude de sa possibilité d'être générique à toute étude de cas formalisée de la même manière que la présente étude), il est nécessaire de l'appliquer sur au moins 3 cas différents.

En effet, la modification d'un seul paramètre physique dans une étude de cas peut naturellement conduire à une étude de cas différente de la première. Dans cette optique, nous avons appliqué la méthode proposée sur le même problème d'optimisation présenté dans la section 3.2.2 en modifiant uniquement la zone climatique. Pour cela, nous avons considéré les 6 zones réglementaires présentes dans le RTCM (voir section 1.3.2), dans la mesure où nous travaillons dans la présente étude sur un bâtiment résidentiel typiquement marocain.

3.3.1 Métamodélisation

Pour la métamodélisation de modèles de substitution pour les différentes zones climatiques considérées, nous avons adopté les mêmes démarches, principes et modalités d'exécution de la phase de pré-optimisation présentée dans la section 3.2.3. À cet égard, les résultats obtenus en matière de précision du pouvoir prédictif des modèles développés sont illustrés dans la Figure 3.19, la Figure 3.20, la Figure 3.21, la Figure 3.22, la Figure 3.23, la Figure 3.24, la Figure 3.25, la Figure 3.26, la Figure 3.27, la Figure 3.28, la Figure 3.29 et la Figure 3.30.

Comme nous l'avons vu dans la section 3.2.3, l'évaluation des modèles de substitution est effectuée en utilisant les indicateurs de fiabilité de prédiction les plus importants et les plus fréquemment utilisés dans la littérature, à savoir RMSE et R. Naturellement, RMSE fournit une vue complète de la distribution des erreurs pour tout type d'évaluation prédictive similaire à la présente. En effet, l'évaluation des modèles ANN-MLP à travers ces indicateurs n'a pas de règle de valeur de référence puisqu'elle dépend absolument du nombre d'observations. Cela signifie qu'un RMSE qui varie autour de 2 pour une évaluation prédictive d'une taille d'observation similaire à celle présentée dans cette étude semble très satisfaisant. Pour sélectionner les modèles de substitution ayant une fiabilité significative pour chacune des zones climatiques considérées, 10 simulations ont été établies pour chacun d'eux, en les soumettant à un calcul de RMSE selon l'Eq. (2.28).

Après avoir effectué ces simulations, il s'avère que la distribution des erreurs évolue de manière évolutive. Cependant, les valeurs RMSE obtenues pour chacun des indicateurs de performance sont inférieures à 3, ce qui est suffisamment faible pour fournir une prédiction élevée comme le montrent les figures ci-dessous. Dans ce cas, les modèles ANN-MLP sélectionnés sont ceux

qui présentent le RMSE le plus faible pour chaque zone climatique. En outre, cela garantit une fiabilité prédictive élevée puisque la corrélation entre les valeurs prédites et simulées est proche de 1, ce qui correspond à une corrélation très élevée, comme le montrent les figures ci-dessous.

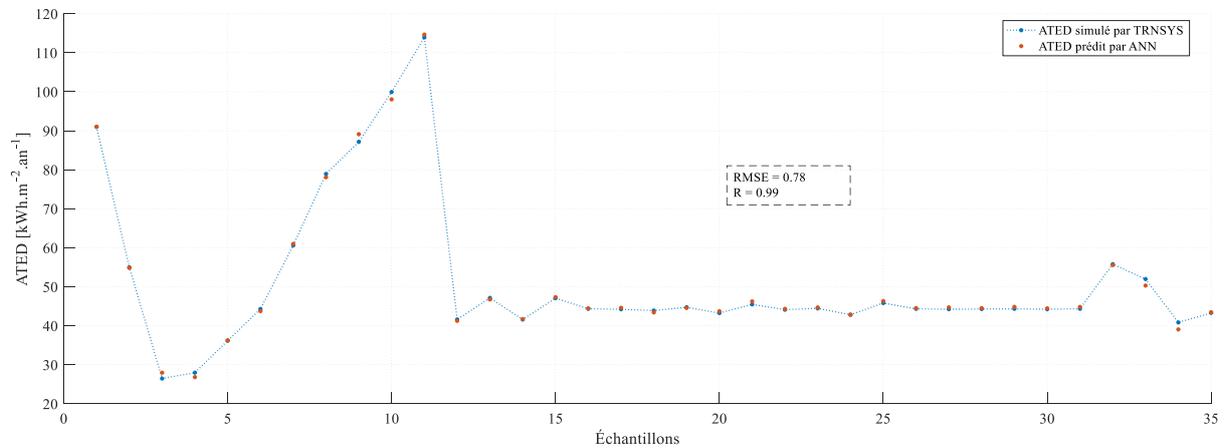


Figure 3.19. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Agadir.

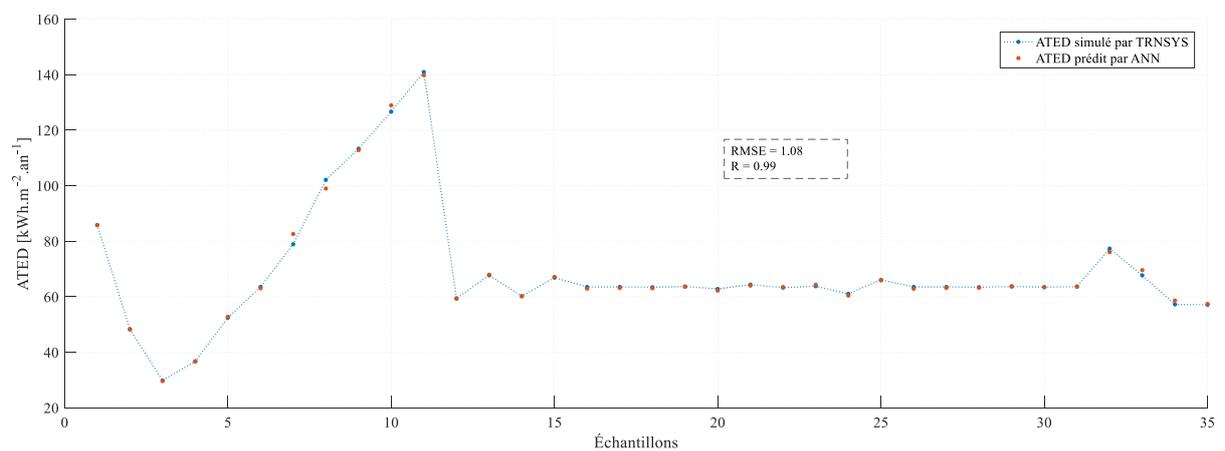


Figure 3.20. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Tanger.

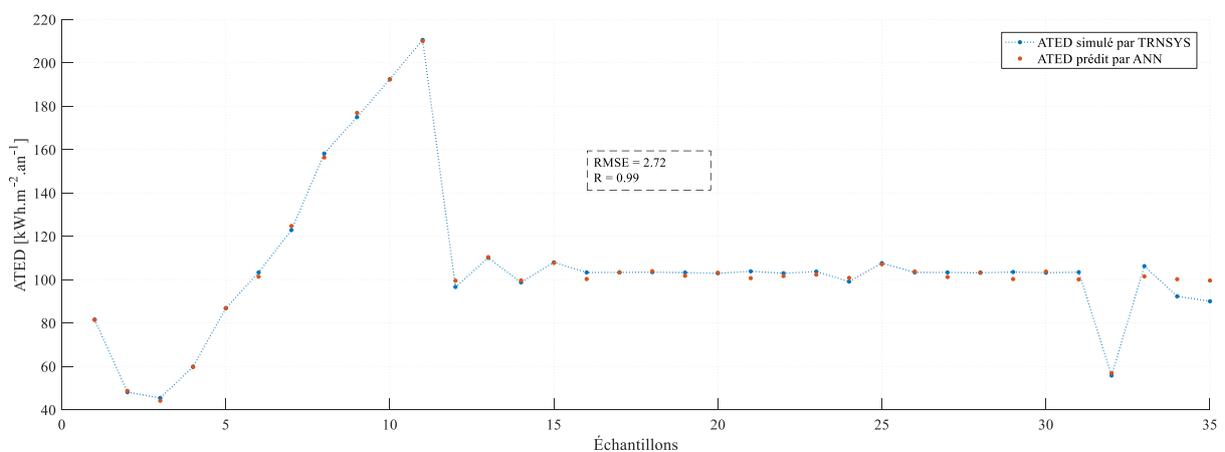


Figure 3.21. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Fes.

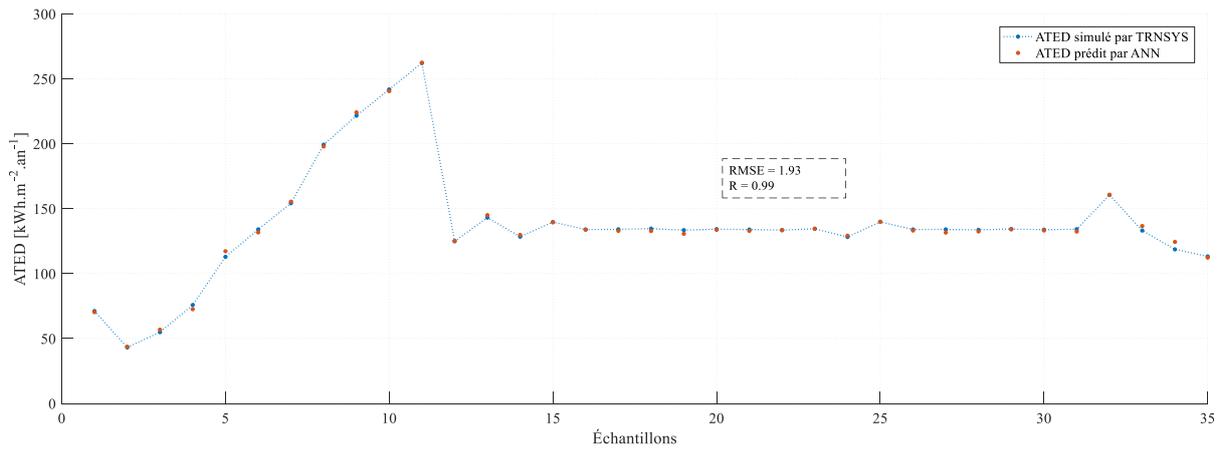


Figure 3.22. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Ifrane.

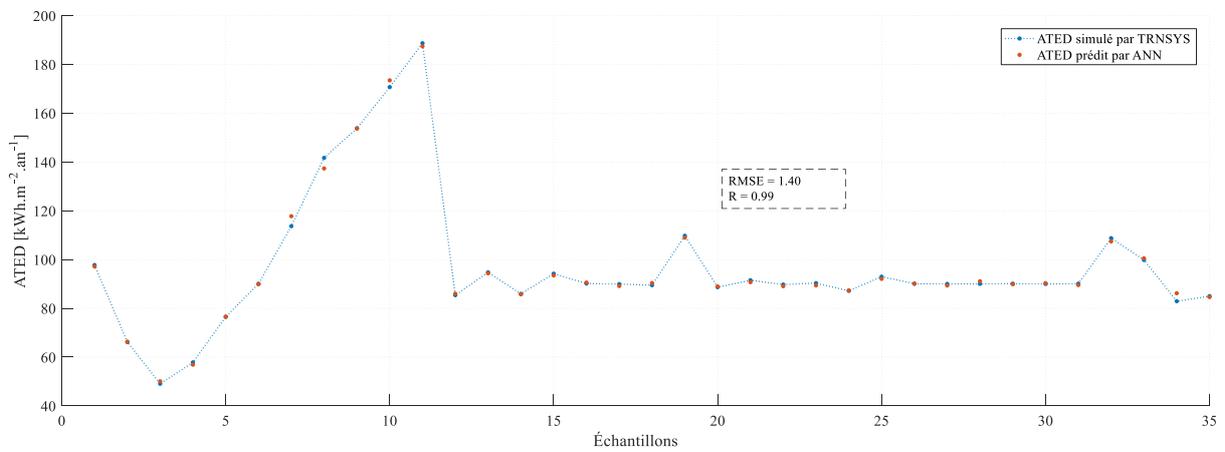


Figure 3.23. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Marrakech.

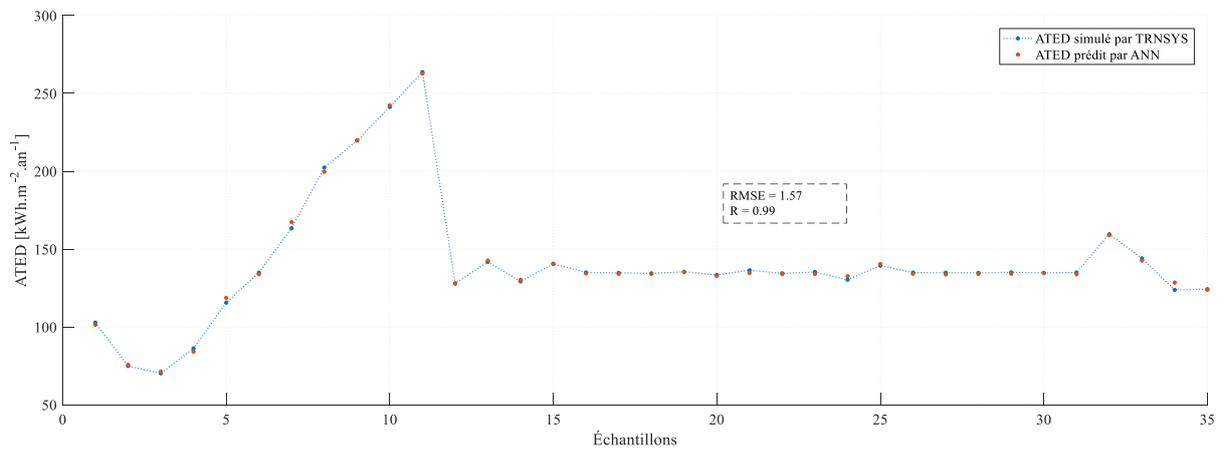


Figure 3.24. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ATED à Errachidia.

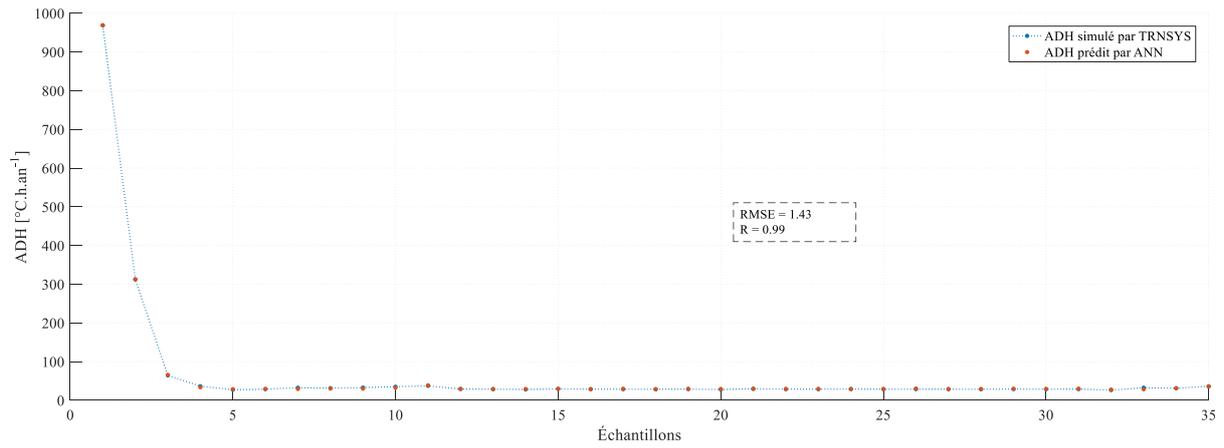


Figure 3.25. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Agadir.

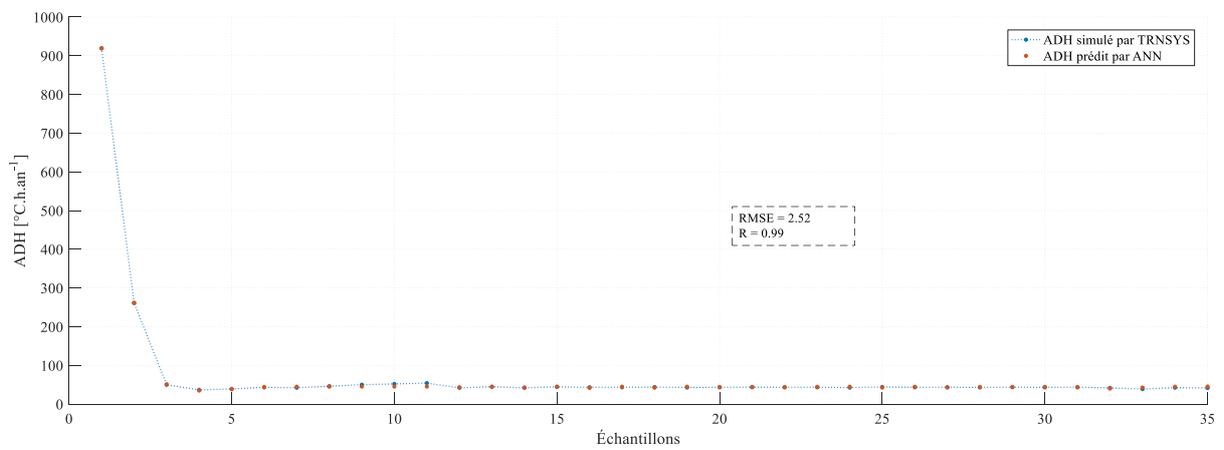


Figure 3.26. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Tanger.

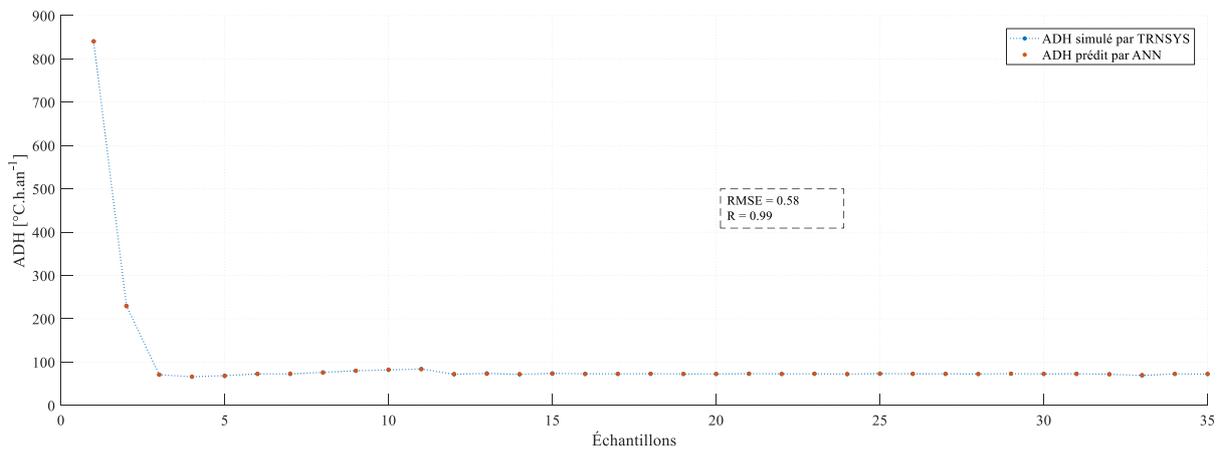


Figure 3.27. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Fes.

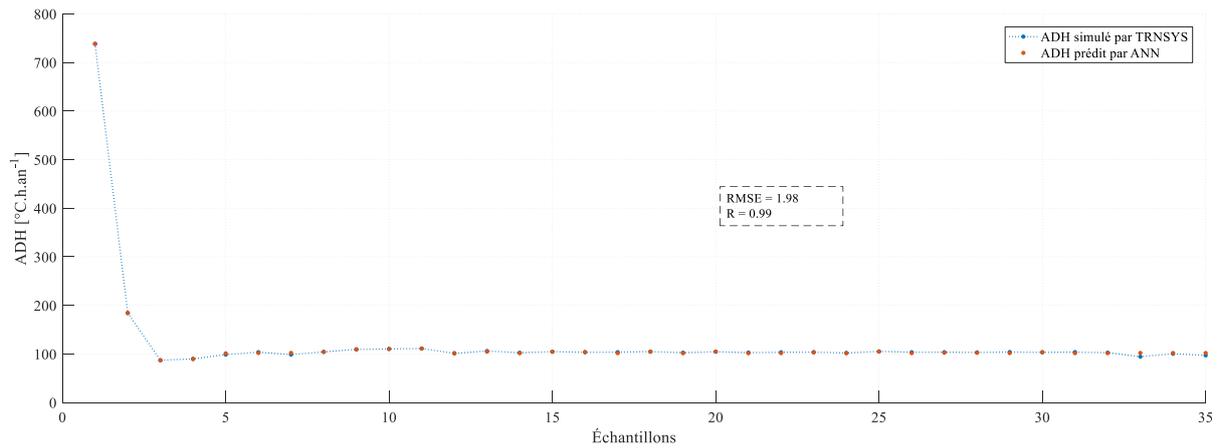


Figure 3.28. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Ifrane.

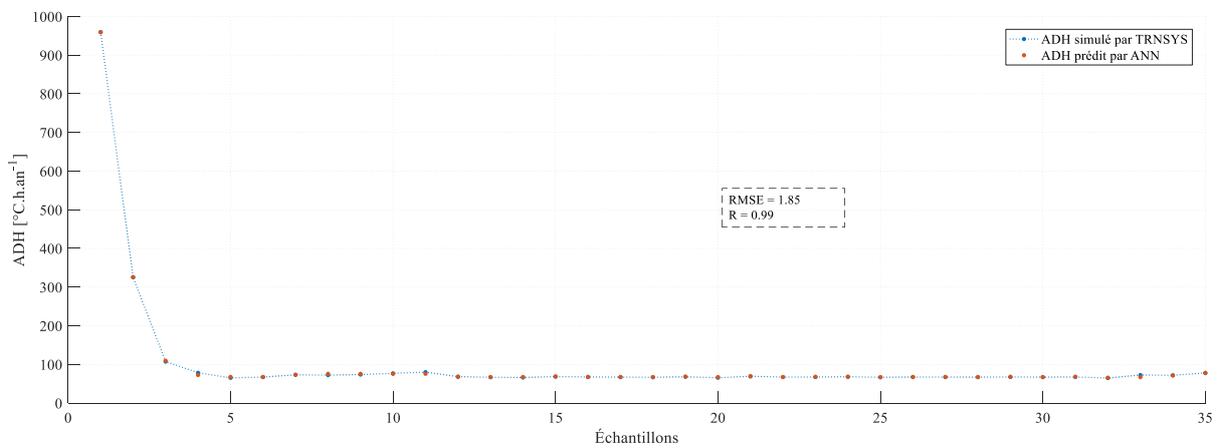


Figure 3.29. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Marrakech.

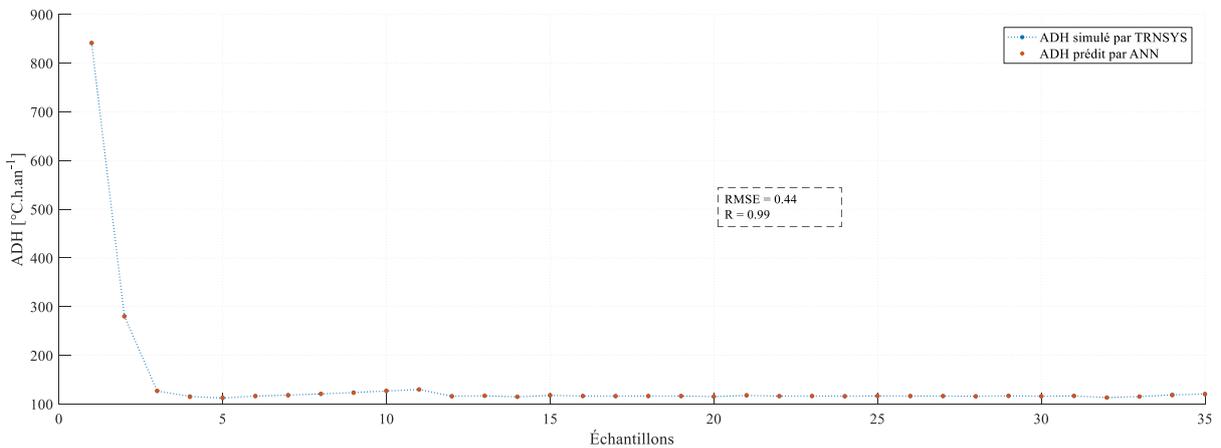


Figure 3.30. La précision prédictive du modèle ANN-MLP pour l'ADH à Errachidia.

3.3.2 Optimisation

Comme nous l'avons vu précédemment, l'optimisation est une étape clé de l'approche proposée, permettant dans ce cas d'optimiser les deux indicateurs de performance considérés, à savoir l'ATED et l'ADH. Cette optimisation conduira à trouver les solutions qui permettent de concevoir de manière optimale les bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique.

Dans cette étude, l'optimisation est effectuée en utilisant le MOPSO, puisqu'il a montré les meilleures performances par rapport aux autres algorithmes pour une telle étude de cas (voir section 3.2.4.1). La mise en application de cet algorithme a été réalisée conformément à son principe de fonctionnement présenté dans la section 2.2.3.2.3.5.2.

Comme nous l'avons vu précédemment, la performance des algorithmes d'optimisation ne dépend pas seulement du problème d'optimisation, mais aussi des paramètres de contrôle. Dans cette étude, les paramètres du MOPSO ont été définis sur la base de ceux présentés dans le Tableau 3.7. La taille de la population et le nombre d'itérations ont été fixés à 50 et 75 respectivement, étant donné qu'ils ont démontré la convergence la plus réussie en termes de performance dans la section 3.2.4.

Les résultats obtenus au terme du processus d'optimisation montrent que le spectre Pareto-optimal varie d'une zone climatique à l'autre, comme le montrent les figures ci-dessous (soit la Figure 3.31, la Figure 3.32, la Figure 3.33, la Figure 3.34, la Figure 3.35 et la Figure 3.36. Ce constat est tout à fait naturel puisqu'il dépend fortement de la sévérité du climat. Dans chacune de ces figures, on trouve une petite case indiquant les 3 meilleures solutions pour chaque zone climatique. L'application de l'une de ces solutions à l'enveloppe du bâtiment permet à la fois de minimiser la consommation d'énergie et d'améliorer le confort thermique des occupants. Le Tableau 3.13 présente les variables de conception optimales correspondant à la meilleure solution parmi les 3 meilleures solutions obtenues pour chaque zone climatique, de manière à évaluer son potentiel d'amélioration en termes de performances énergétiques.

En effet, les performances évaluées concernent la consommation énergétique et le confort thermique, qui sont bien représentés par les indicateurs de performance décrits par l'Eq. (3.1) et l'Eq. (3.2), à savoir l'ATED et l'ADH. Le Tableau 3.14 présente donc l'évaluation de la solution sélectionnée, qui devrait être appliquée à l'enveloppe du bâtiment, par rapport à la conception de base dans chaque zone climatique considérée. Il ressort des résultats, en utilisant l'Eq. (3.13), que les potentiels d'amélioration sont énormes dans la plupart des zones climatiques, où il existe un taux qui atteint en moyenne près de 75% et 50% respectivement pour l'ATED et l'ADH. A Ifrane, par exemple, le potentiel d'amélioration atteint 81.39%, ce qui représente une économie d'énergie très importante. De plus, ces résultats démontrent la robustesse de l'approche proposée, qui constitue une étape très prometteuse vers la réalisation de bâtiments confortables et à consommation énergétique quasi nulle. En outre, ces solutions sont destinées à répondre de manière significative aux exigences réglementaires qui sont bien décrites dans le RTCM (voir section 1.3.2).

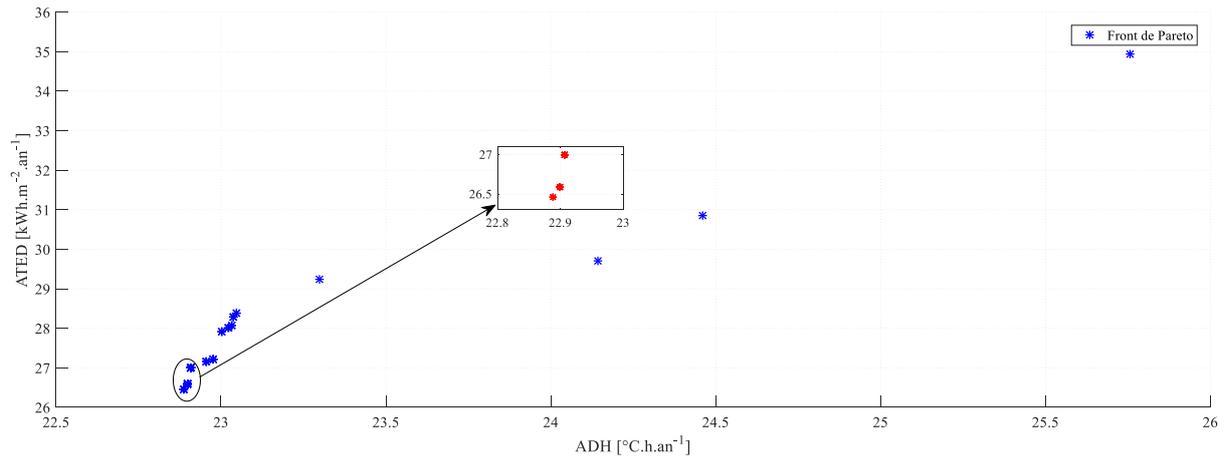


Figure 3.31. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat d'Agadir.

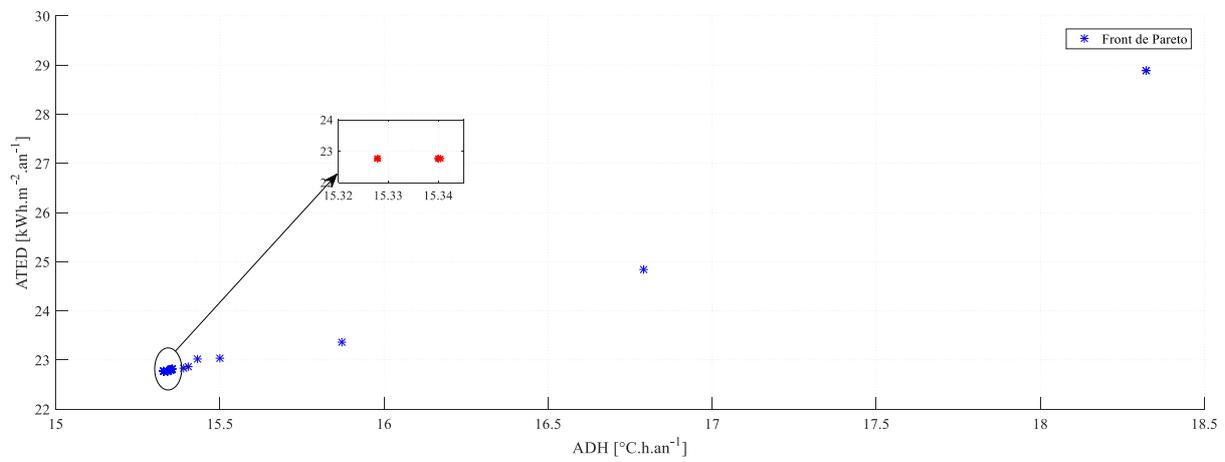


Figure 3.32. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat de Tanger.

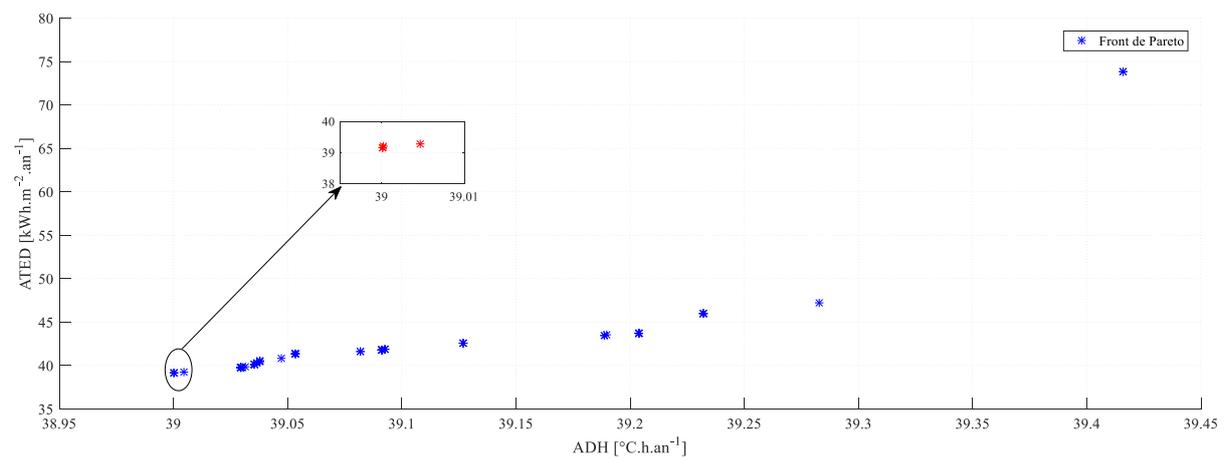


Figure 3.33. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat de Fes.

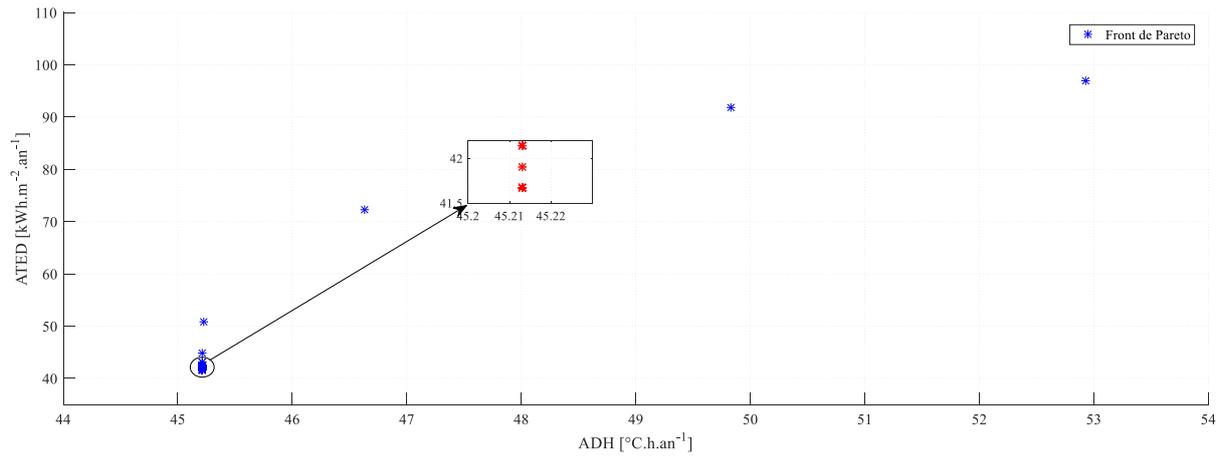


Figure 3.34. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat d'Ifrane.

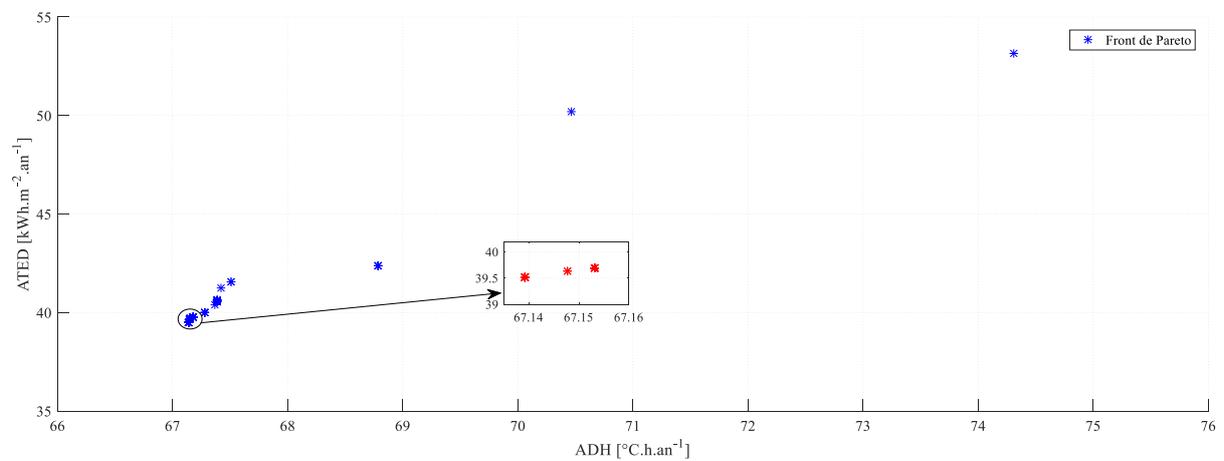


Figure 3.35. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat de Marrakech.

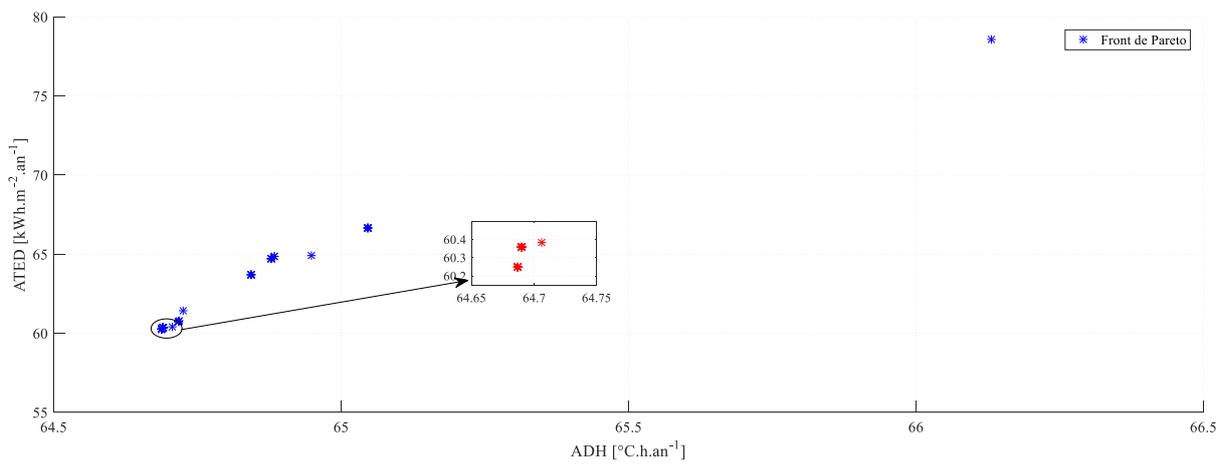


Figure 3.36. Frontières de Pareto obtenues par MOPSO pour le climat d'Errachidia.

Tableau 3.13. Variables de conception de la meilleure solution pour chaque zone climatique.

Variable de conception	Unité	Agadir	Tanger	Fes	Ifrane	Marrakech	Errachidia
Coefficient de transmission des murs extérieurs	W.m ² .K ⁻¹	1.08	0.12	0.10	0.40	0.10	0.11
Coefficient de transmission du toit	W.m ² .K ⁻¹	0.10	0.10	0.80	0.10	0.11	0.57
Coefficient de transmission du plancher	W.m ² .K ⁻¹	0.97	0.47	1.16	0.10	0.92	0.20
Coefficient d'absorption des murs extérieurs	-	0.55	0.45	0.10	0.67	0.52	0.54
Coefficient d'absorption du toit	-	0.33	0.90	0.65	0.43	0.46	0.54
Coefficient linéaire des ponts thermiques	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0.43	0.21	0.11	0.03	0.83	0.76
Renouvellement d'air par heure	v.h ⁻¹	0.01	0.30	0.13	0.00	0.27	0.82
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers le Nord	-	0.82	1.00	0.26	0.52	0.73	0.35
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers le Sud	-	0.48	0.18	0.22	1.00	0.43	0.81
Coefficient de protection solaire pour les fenêtres orientées vers l'Est	-	0.73	0.38	0.67	0.00	0.00	0.27
Vitrage	-	Glz ₃	Glz ₅	Glz ₃ - Glz ₄	Glz ₂	Glz ₄	Glz ₁ - Glz ₂

Notez que la composition [Glz_j - Glz_{j+1}] signifie que cette variable correspond au milieu des deux frontières.

Tableau 3.14. Potentiel d'amélioration de la solution retenue par rapport à la conception de base dans chaque zone climatique.

Zone climatique	Conception du bâtiment	Fonction objectif	Valeur	Potentiel d'amélioration (%)
Agadir	Base	ATED	60.73	56.42
	Optimisée		26.46	
	Base	ADH	38.28	
	Optimisée		22.89	
Tanger	Base	ATED	103.05	77.89
	Optimisée		22.78	
	Base	ADH	53.93	
	Optimisée		15.32	
Fes	Base	ATED	168.52	76.76
	Optimisée		39.16	
	Base	ADH	84.00	
	Optimisée		39.00	
Ifrane	Base	ATED	223.99	81.39
	Optimisée		41.68	
	Base	ADH	112.49	
	Optimisée		45.21	
Marrakech	Base	ATED	147.70	73.25
	Optimisée		39.51	
	Base	ADH	81.00	
	Optimisée		67.14	
Errachidia	Base	ATED	232.81	74.12
	Optimisée		60.25	
	Base	ADH	129.08	
	Optimisée		64.69	

3.3.3 Evaluation de l'autosuffisance énergétique

3.2.3.1.3.4 L'évaluation de l'autosuffisance énergétique permet de mettre en exergue le niveau de satisfaction énergétique d'un bâtiment obtenu grâce à une concordance optimale entre ses volets passif et actif, sans recourir au réseau électrique. Cette évaluation est basée sur la comparaison des résultats obtenus (différentes mesures d'évaluation) d'un bâtiment optimisé doté d'un système de production d'énergie locale par rapport à un bâtiment de référence doté du même système.

3.3.3.1 Modélisation

Dans cette étude, la solution sélectionnée pour chaque zone climatique, comme indiqué dans le Tableau 3.13, a été introduite dans la partie passive du bâtiment de référence, en la reliant à un système local d'approvisionnement en énergie hybride basé sur des sources renouvelables, à savoir le photovoltaïque et l'éolien, comme le montre le schéma synoptique présenté dans la Figure 3.37. L'objectif est de montrer à quel niveau l'optimisation de la partie passive du bâtiment peut améliorer son autosuffisance énergétique, voire le rendre indépendant du réseau électrique.

L'évaluation de l'autosuffisance énergétique du bâtiment étudié ne peut être établie que si, et seulement si, les résultats de la simulation thermique dynamique de l'ensemble du système sont disponibles. Le procédé dynamique représentant le présent système a été modélisé dans l'environnement TRNSYS (voir Annexe 6) selon le principe de fonctionnement exposé dans la Figure 3.37. Ce procédé est modélisé par un groupe de composants énergétiques interconnectés, existant dans la bibliothèque de composants intrinsèques de TRNSYS, qui collectent, transforment et produisent de l'énergie électrique pour répondre principalement à la demande en chauffage et en climatisation du bâtiment considéré. L'adaptation de la tension est réalisée via des convertisseurs statiques comme le redresseur AC/DC, le convertisseur DC/DC et l'onduleur DC/AC. Les résultats de la simulation sont visualisés en temps réel.

Il convient de noter que la modélisation mathématique de l'intégralité du système exposé dans la Figure 3.37 est bien présentée par Chegari et al. [269]. Où P_{PV} est la puissance produite par le générateur PV en [W], P_W est la puissance produite par l'éolienne en [W], $P_{PV,eff}$ est la puissance effective produite par le générateur PV en [W], $P_{W,eff}$ est la puissance effective produite par l'éolienne en [W]. P_g est la puissance totale générée en [W], P_{tb} est la puissance transmise à la batterie en [W], P_{fb} est la puissance tirée de la batterie en [W], P_{tg} est la puissance transmise au réseau en [W], P_{fg} est la puissance tirée du réseau en [W] et P_{tl} est la puissance transmise aux charges en [W].

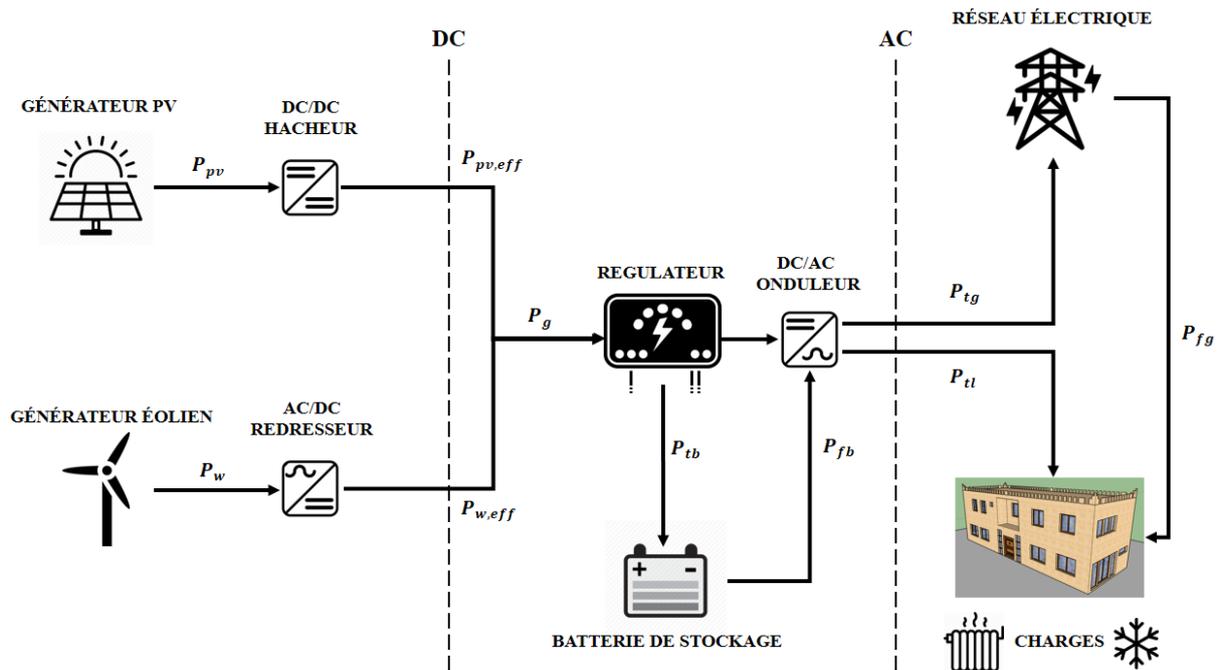


Figure 3.37. Architecture du système local d'approvisionnement en énergie pour répondre aux charges thermiques du bâtiment.

Les charges électriques considérées dans cette étude de cas sont éventuellement celles de la demande de chauffage et de climatisation, puisqu'elles représentent environ 60% de la consommation d'énergie électrique du bâtiment. Ces charges sont supposées être de nature thermique, mais grâce aux coefficients de performance énergétique COP et EER, nous pouvons les avoir de nature électrique. Il est à noter que les charges thermiques latentes n'ont pas été prises en compte.

Les hypothèses prises en considération pour la mise en configuration du système sont les suivantes :

Tout d'abord, la consommation énergétique journalière, comme indiqué dans la section 3.2.3.1.3.2, est estimée à $24\ 000\ \text{Wh}\cdot\text{jour}^{-1}$. Alors, sur la base des formules fondamentales de calcul, nous aurons besoin d'une puissance crête de 3000Wp générée par un champ photovoltaïque [303] composé de 12 éléments de 250Wp chacun, connectés en série. Une puissance de 3200Wp générée par une éolienne adaptée au secteur résidentiel [304]. Ensuite, un parc d'accumulateurs d'énergie électrique [305] composé de 4 batteries de 3000Wh chacune, connectées en série, d'un régulateur de charge avec une efficacité de 98% [306], d'un convertisseur DC/DC avec une efficacité de 92% [307], d'un redresseur AC/DC avec une efficacité de 86% [308] et d'un onduleur DC/AC avec une efficacité de 98% [309]. Les caractéristiques électriques de chaque composant du présent système sont présentées dans l'Annexe 6.

3.3.3.2 Résultats

Les résultats de la simulation sont résumés dans le Tableau 3.15, qui montre le taux d'autosuffisance énergétique (ESS), tant pour la conception de base que pour la conception optimisée, ainsi que le potentiel d'amélioration (I_p) pour chacune des zones climatiques considérées. Il ressort de ce tableau que la conception optimisée permet de réaliser un taux d'autosuffisance énergétique qui atteint 85% en moyenne pour les différents climats étudiés. Ce taux signifie que 85% des besoins énergétiques sont satisfaits par le système local d'approvisionnement en énergie, le reste étant fourni par le réseau électrique. Bien que cette moyenne soit donnée à titre indicatif, il s'avère que dans certaines zones, la demande résiduelle à couvrir par le réseau n'atteint même pas 5%, notamment dans la ville de Tanger. Quant au potentiel d'amélioration, il apparaît que les performances de bâtiment étudié dans certaines zones sont significativement améliorées, en particulier à Ifrane, où le taux pourrait atteindre 136.21%, ce qui signifie que les économies d'énergie réalisées sont multipliées par 1.36 par rapport à la conception de base. Notez que le terme « Opt » fait référence à la conception optimisée du bâtiment obtenue par la solution retenue donnée dans le Tableau 3.13.

Tableau 3.15. L'autosuffisance énergétique et le potentiel d'amélioration pour chacune des zones climatiques étudiées.

Zone climatique	Agadir		Tanger		Fes		Ifrane		Marrakech		Errachidia	
	Base	Opt	Base	Opt	Base	Opt	Base	Opt	Base	Opt	Base	Opt
Conception												
ESS (%)	71.07	93.17	69.11	95.16	46.41	88.32	34.56	81.64	44.61	85.65	33.02	64.78
I_p (%)	31.11		37.70		90.31		136.21		92.02		96.14	

Pour mieux comprendre ces résultats, deux zones climatiques différentes, à savoir les zones 1 et 6 selon le RTCM, ont été sélectionnées en fonction de la sévérité du climat, comme le rayonnement solaire, la température extérieure, la vitesse du vent, etc. afin de montrer de manière dynamique comment ces améliorations se produisent. Les deux zones climatiques sont Agadir, qui présente un climat semi-aride chaud, et Errachidia, qui présente un climat désertique chaud. La période considérée pour illustrer les résultats est de 7 jours à partir du 1^{er} jour du mois le plus défavorable en hiver.

Les figures suivantes montrent les différents indicateurs qui révèlent les améliorations apportées.

La Figure 3.38 et la Figure 3.41 montrent la variation de la production d'énergie locale et de la demande d'énergie électrique pour la conception de base et la conception optimisée du bâtiment. Il apparaît que la production d'énergie électrique est la même dans les deux cas, ce qui est tout à fait naturel, puisque l'objectif est d'évaluer l'autosuffisance énergétique découlant de la

conception optimisée du bâtiment plutôt que le système de production d'énergie. Quant à la variation de la demande d'énergie électrique, il s'avère que les charges ont diminué, car la mise en œuvre de la solution sélectionnée, présentée dans le Tableau 3.13, au niveau de l'enveloppe a permis d'améliorer la performance énergétique du bâtiment étudié.

La Figure 3.39 et la Figure 3.42 montrent la variation de l'énergie transmise à la charge et de l'énergie transmise ou tirée de la batterie pour la conception de base et la conception optimisée. Il apparaît que l'énergie transmise à la charge a diminué pour la conception optimisée par rapport à la conception de base, ce qui s'explique par le fait que les besoins énergétiques ont été réduits par la solution présentée dans le Tableau 3.13. Quant à l'énergie transmise ou tirée des batteries, il s'avère qu'elle a diminué dans le cas de la conception optimisée. Ceci est dû au fait que les besoins en énergie ont été réduits, ce qui réduira significativement la dépendance à l'énergie des batteries, et donc les batteries resteront chargées le plus longtemps possible.

La Figure 3.40 et la Figure 3.43 montrent la variation de l'énergie transmise ou tirée du réseau électrique pour la conception de base et la conception optimisée. Il s'avère que dans le cas de la conception optimisée, l'énergie transmise au réseau est augmentée, tandis que l'énergie tirée du réseau est considérablement réduite par rapport à la conception de base. Cela est dû au fait que la conception optimisée a permis au bâtiment d'atteindre une satisfaction énergétique assez élevée, qui est assurée par le système d'approvisionnement énergétique local.

Enfin, on peut conclure que ces résultats sont suffisamment satisfaisants et prometteurs pour affirmer que la présente approche est suffisamment efficace, fiable et rapide pour relever le défi de la conception de bâtiments confortables et à très haute efficacité énergétique.

Il est à noter que l'Annexe 8 a été introduite pour illustrer les résultats des simulations de l'évolution de ces indicateurs pour les autres zones climatiques, soit la zone 2, 3, 4 et 5.

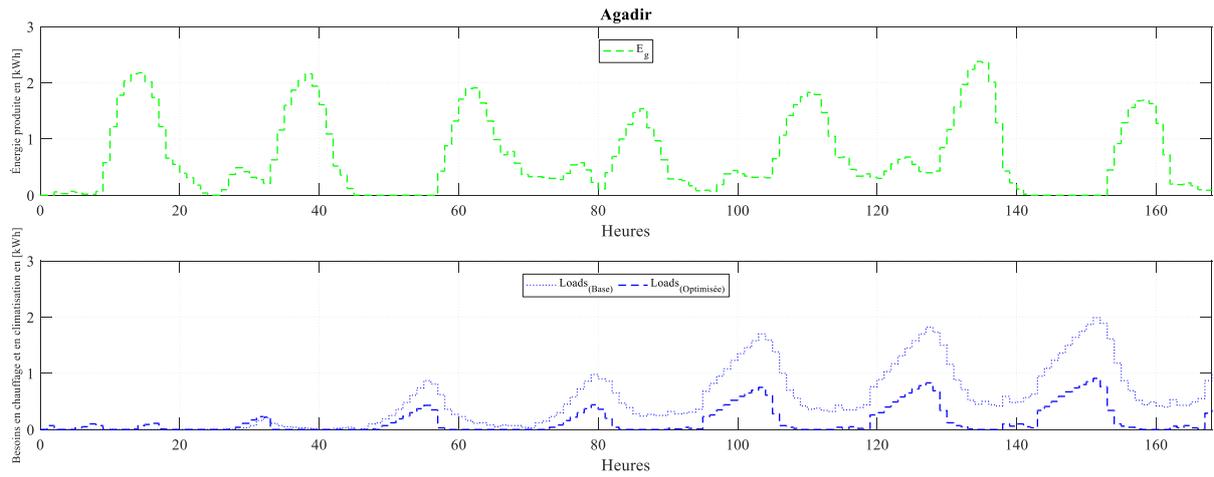


Figure 3.38. Variation de la production d'énergie locale et de la demande d'énergie électrique pour la conception de base et la conception optimisée à Agadir.

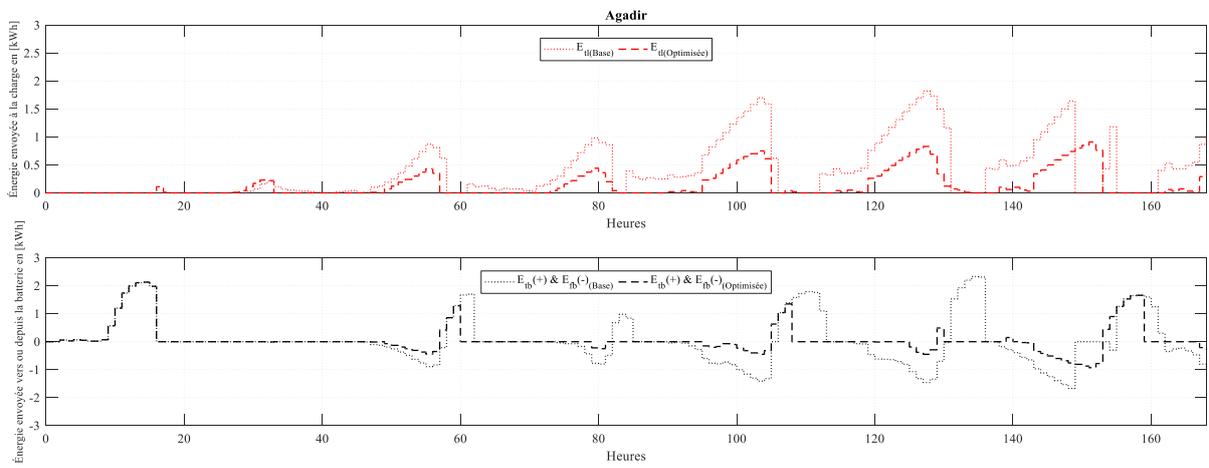


Figure 3.39. Variation de l'énergie envoyée à la charge et de l'énergie envoyée ou tirée de la batterie pour la conception de base et la conception optimisée à Agadir.

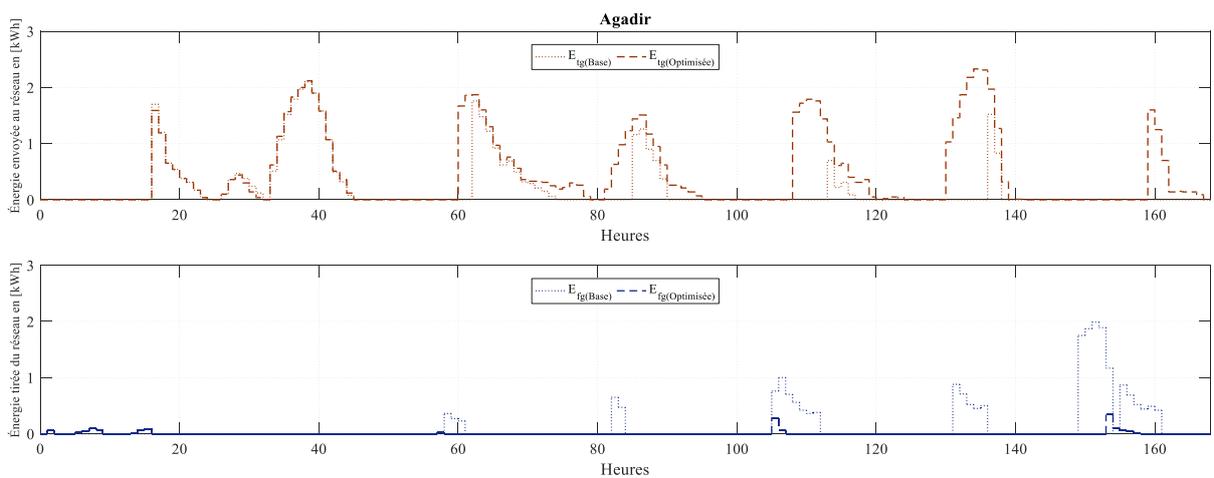


Figure 3.40. Variation de l'énergie envoyée ou tirée du réseau pour la conception de base et la conception optimisée à Agadir.

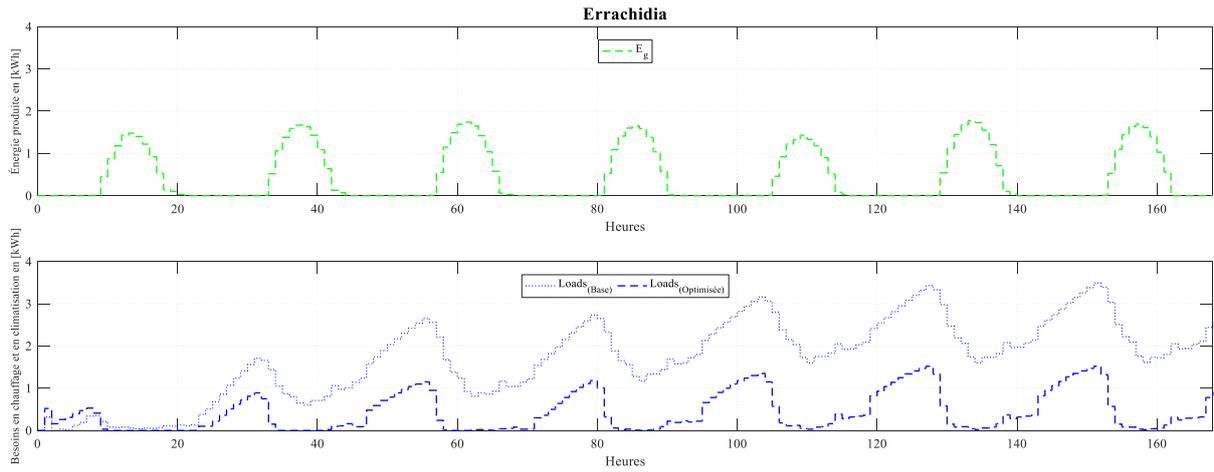


Figure 3.41. Variation de la production d'énergie locale et de la demande d'énergie électrique pour la conception de base et la conception optimisée à Errachidia.

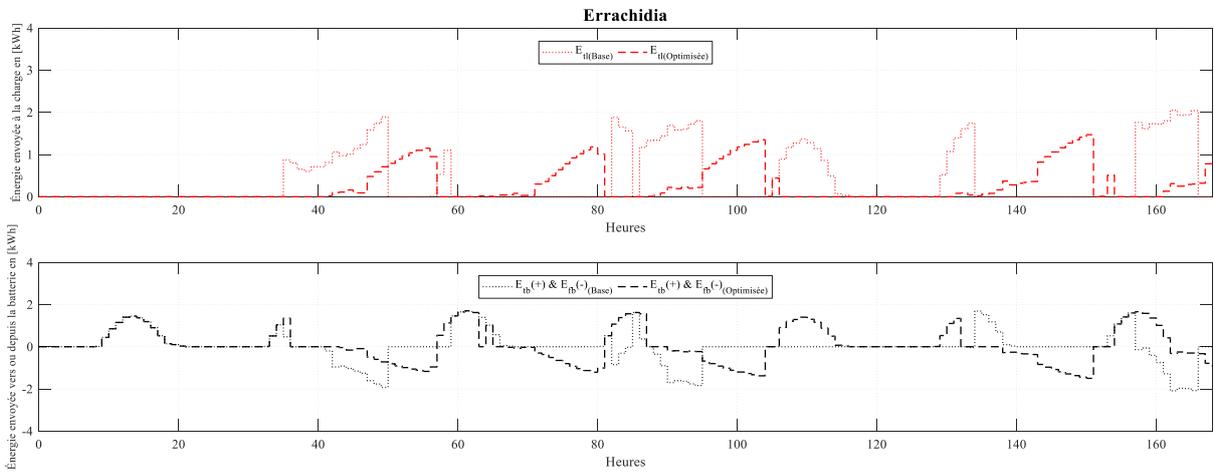


Figure 3.42. Variation de l'énergie envoyée à la charge et de l'énergie envoyée ou tirée de la batterie pour la conception de base et la conception optimisée à Errachidia.

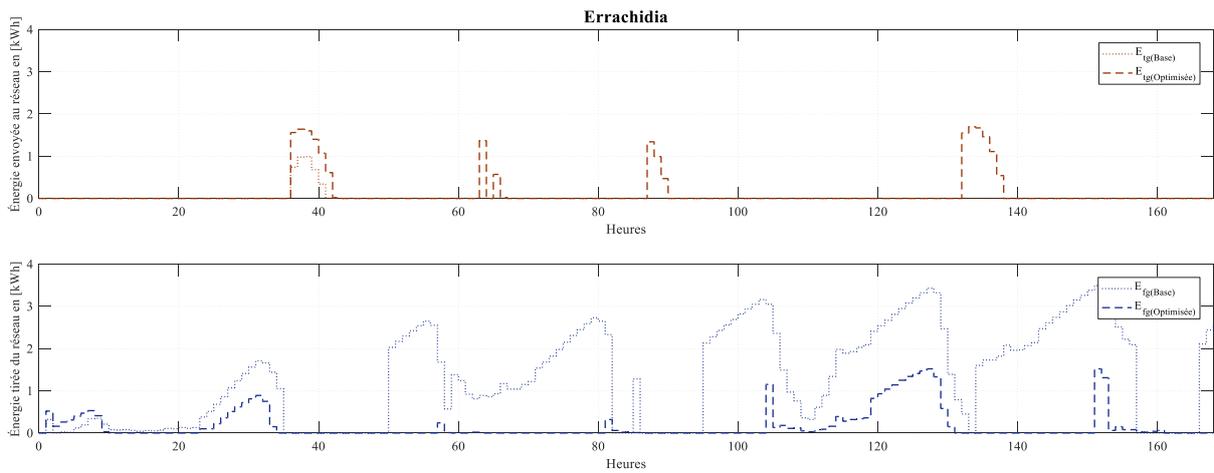


Figure 3.43. Variation de l'énergie envoyée ou tirée du réseau pour la conception de base et la conception optimisée à Errachidia.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a montré comment et en quoi la méthode de résolution que nous avons développée peut contribuer à la conception de bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique.

Le développement des modèles de substitution optimaux a permis d'estimer les besoins énergétiques et le taux d'inconfort thermique, représentés respectivement par les fonctions objectif ATED et ADH, avec une prédiction pratiquement parfaite. L'utilisation de ces modèles permet d'aboutir à l'exécution du processus d'optimisation qui, à son tour, garantit l'obtention du Front de Pareto optimal théorique avec une bonne précision.

L'application de la méthode proposée à une étude de cas portant particulièrement sur la zone 5 (Marrakech) a permis d'une part, de démontrer sa faisabilité, sa fiabilité et sa rapidité. D'autre part, elle a fait apparaître la possibilité d'identifier un ensemble de solutions techniques efficaces sous forme de surface de compromis entre les différents critères considérés. Sa propriété intrinsèque découlant du fait qu'elle est générique a été démontrée par la réussite de son application non seulement sur une seule zone climatique mais aussi sur 6 zones climatiques réglementaires.

Les résultats de l'application de cette méthode ont mis en évidence la richesse des informations issues de l'optimisation. Le compromis nécessaire entre la réduction des besoins énergétiques et l'amélioration du confort thermique a été obtenu à travers une série de solutions qui proposent une sorte de variante par rapport aux variables de conception.

Un système hybride de production locale d'énergie a été conçu pour évaluer le taux d'autosuffisance énergétique du bâtiment étudié. L'intégration des solutions obtenues au niveau de son enveloppe a permis d'améliorer très significativement l'autosuffisance énergétique, pouvant atteindre l'autosuffisance intégrale pour certaines zones.

Nous pouvons finalement affirmer que le volet passif du bâtiment a un rôle plus important que ce que les parties prenantes estiment pour remplir les piliers de la conception de bâtiments confortables et à consommation énergétique quasi nulle.

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse avait pour objectif principal le développement d'une nouvelle méthode puissante, fiable et rapide pour la conception de bâtiments confortables et efficaces sur le plan énergétique. En se basant sur des outils de simulation numérique et sur les techniques d'intelligence artificielle, nous avons développé avec succès des modèles de substitution permettant la prédiction optimale des besoins énergétiques et du confort thermique pour le cas des bâtiments résidentiels. Le choix et la configuration des variables de conception ont été judicieusement établis sur la base de l'état actuel de la technique, étayés par une analyse de sensibilité, afin de mieux comprendre à la fois l'influence de chaque variable sur les performances attendues et la corrélation entre elles. Ceci nous a permis de formuler mathématiquement le problème que nous souhaitons à optimiser, dont la résolution entraîne la recherche de solutions optimales dans une dimension multi-objectif. A l'aide des algorithmes métaheuristiques, le processus d'optimisation est effectué de manière fructueuse conduisant à la génération de la frontière de Pareto optimale, qui n'est rien d'autre qu'un ensemble de solutions optimales au regard des critères considérés. Cet ensemble de solutions nous permet ainsi, d'atteindre l'objectif recherché avec une très bonne précision, et surtout un temps de calcul drastiquement réduit. Cette méthode peut donc être un outil très efficace pour aider les concepteurs et les décideurs dans le domaine de la construction à concevoir des bâtiments confortables et à haute efficacité énergétique.

Dans un premier temps, nous avons présenté de manière assez synthétique la thématique de l'énergétique du bâtiment dans sa globalité, en mettant l'accent sur le contexte et les enjeux, le cadre réglementaire et enfin les paramètres de chacun des volets actif et passif du bâtiment. L'objectif est de mieux comprendre cette thématique et les retombées qu'elle peut procurer, dans la mesure où le bâtiment est considéré comme étant le secteur le mieux placé pour offrir des opportunités de progrès suffisamment importantes pour répondre à la problématique planétaire de la crise énergétique et du réchauffement climatique. Il se positionne ainsi comme un facteur clé pour relever les défis énergétiques, économiques et environnementaux.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons réalisé une étude bibliographique assez solide sur les différentes techniques utilisées dans cet axe de recherche, avec des analyses critiques qui nous permettent de détecter les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles. Nous avons constaté que l'ensemble des méthodes qui existent dans la littérature sur cet axe de recherche sont basées sur 3 étapes fondamentales qui peuvent être nommées comme suit : formulation, pré-optimisation et optimisation. Il ressort de cette revue de la littérature que

l'étape de pré-optimisation présente de nombreuses lacunes qui, d'une manière ou d'une autre, constituent des anomalies au regard de la fiabilité, de la précision et surtout de la rapidité du processus de résolution. Ces anomalies rendent difficile pour les concepteurs et les décideurs de prendre des décisions rationnelles dans un temps de calcul raisonnable, ce qui les empêche de recourir à de telles approches en ingénierie. Pour cette raison, les solutions intuitives qui ne sont pas optimales par rapport aux critères prédéfinis peuvent malheureusement être exécutées dans la phase de conception des bâtiments. Afin de remédier à ce problème, nous avons proposé une nouvelle méthode basée sur des modèles de substitution, développés par l'utilisation de réseaux de neurones artificiels optimisés, et des algorithmes métaheuristiques. L'application de cette méthode sur différentes études de cas a montré son efficacité en termes de fiabilité, de précision et surtout de rapidité.

Au chapitre 3, la méthode développée a été appliquée à un problème d'optimisation complexe de grande taille, soit 11 variables de conception à plusieurs niveaux et 2 fonctions objectif, soumis à des contraintes éventuelles. La résolution de ce problème d'optimisation converge vers des solutions qui permettent la configuration optimale de l'enveloppe du bâtiment. Cela a permis la conception de bâtiments typiquement confortables et à consommation énergétique quasi nulle dans différentes zones climatiques du Maroc. Grâce à la combinaison de réseaux de neurones artificiels avec l'algorithme PSO, qui permet une mise à jour optimale des poids et des biais du réseau afin d'améliorer sa précision, nous avons pu développer des modèles de substitution permettant une prédiction très précise des besoins énergétiques et des degrés-heures d'inconfort thermique. L'apprentissage de ces modèles s'est appuyé sur des bases de données ne comprenant pas plus de 35 échantillons (c'est-à-dire que le temps de calcul nécessaire à la simulation est minimal) simulés à l'aide d'une plateforme modélisée dans l'environnement interne de TRNSYS en liaison avec Matlab. La constitution de ces bases de données repose sur une philosophie, développée par nos soins, qui relève d'une certaine logique informationnelle. L'optimisation multi-objectif a ensuite été établie en utilisant l'algorithme MOPSO, où les deux fonctions objectif considérées sont représentées par les modèles de substitution développés, afin de générer le front de Pareto optimale pour chacune des zones climatiques étudiées. En fin, un système hybride de production locale d'énergie a été conçu pour évaluer le taux d'autosuffisance énergétique du bâtiment étudié. L'intégration des solutions obtenues au niveau de son enveloppe a permis d'améliorer très significativement l'autosuffisance énergétique, pouvant atteindre l'autosuffisance intégrale pour certaines zones.

Les résultats de l'application de cette méthode ont mis en évidence la richesse des informations issues de l'optimisation. Le compromis nécessaire entre la réduction des besoins énergétiques et l'amélioration du confort thermique a été obtenu à travers une série de solutions qui proposent une sorte de variante par rapport aux variables de conception. Ces résultats nous permettent de justifier la robustesse, la fiabilité et surtout le temps de calcul extrêmement réduit de la méthode développée, qui contribue de manière très significative à combler les lacunes présentes dans la littérature. Nous notons cependant que cette méthode présente certaines limites qui peuvent être principalement liées à l'intervalle de confiance qu'elle procure, c'est-à-dire que malgré les résultats encourageants que nous avons obtenus, cette méthode doit être utilisée avec prudence. Un test de validation des modèles de substitution par des échantillons de simulation aléatoires est obligatoire pour garantir l'exactitude et la fiabilité des résultats. De plus, même si le temps de calcul à l'aide de ces modèles est fortement réduit, de l'ordre de 35 échantillons nécessaires à l'apprentissage d'un modèle de substitution, cela peut varier de manière négative à positive en fonction de la taille du problème d'optimisation et de ses propriétés intrinsèques.

Dans cette étude, les paramètres de construction choisis ne concernent que l'enveloppe et la ventilation. Nous avons considéré que les matériaux utilisés pour la conception des bâtiments neufs correspondent aux cas réels de construction. Cependant, l'utilisation d'autres types de matériaux est une piste intéressante pour la suite de ce travail. Les matériaux à changement de phase par exemple peuvent être bénéfiques dans le cas du climat Marocain pour améliorer l'inertie des parois extérieures. Il sera également essentiel de développer une approche plus globale en introduisant des systèmes de production locale d'énergie, pas seulement des systèmes classiques mais plutôt des systèmes ayant une certaine gestion optimale du flux énergétique. Enfin, pour rester sur une approche durable, l'intégration des énergies renouvelables, telles que les panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques, les puits climatiques, l'éolien interurbain, sera indispensable pour tendre vers la conception de bâtiments à énergie positive.

Annexe 1-A : Les exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments résidentiels au Maroc [6].

Zone climatique réglementaire	TGBV	U des toitures exposées (W/m ² .K)	U des murs extérieur (W/m ² .K)	U des vitrages (W/m ² .K)	R minimale des planchers sur sol (m ² .K/W)	Facteur Solaire FS* des vitrages
Z1 (Réf. Agadir)	≤ 15%	≤ 0.75	≤ 1.20	≤ 5.80	NE (pas d'exigence)	NE
	16-25%	≤ 0.75	≤ 1.20	≤ 5.80	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.75	≤ 1.20	≤ 3.30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0.5
	36-45%	≤ 0.65	≤ 1.20	≤ 3.30	NE	Nord : ≤ 0.7 Autres : ≤ 0.3
Z2 (Réf. Tanger)	≤ 15%	≤ 0.75	≤ 0.80	≤ 5.80	NE	NE
	16-25%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.65	≤ 0.70	≤ 3.30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0.5
	36-45%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 2.60	NE	Nord : ≤ 0.7 Autres : ≤ 0.3
Z3 (Réf. Fès)	≤ 15%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 0.75	NE
	16-25%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 0.75	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.65	≤ 0.70	≤ 2.60	≥ 0.75	Nord : NE Autres : ≤ 0.5
	36-45%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 1.90	≥ 0.75	Nord : ≤ 0.7 Autres : ≤ 0.5
Z4 (Réf. Ifrane)	≤ 15%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 3.30	≥ 1.25	NE
	16-25%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 3.30	≥ 1.25	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 2.60	≥ 1.25	Nord : ≤ 0.7 Autres : ≤ 0.6
	36-45%	≤ 0.49	≤ 0.55	≤ 1.90	≥ 1.25	Nord : ≤ 0.6 Autres : ≤ 0.5
Z5 (Réf. Marrakech)	≤ 15%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 1.00	NE
	16-25%	≤ 0.65	≤ 0.70	≤ 3.30	≥ 1.00	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 2.60	≥ 1.00	Nord : ≤ 0.6 Autres : ≤ 0.4
	36-45%	≤ 0.49	≤ 0.55	≤ 1.90	≥ 1.00	Nord : ≤ 0.5 Autres : ≤ 0.3
Z6 (Réf. Errachidia)	≤ 15%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 1.00	NE
	16-25%	≤ 0.65	≤ 0.70	≤ 3.30	≥ 1.00	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 2.60	≥ 1.00	Nord : ≤ 0.6 Autres : ≤ 0.4
	36-45%	≤ 0.49	≤ 0.55	≤ 1.90	≥ 1.00	Nord : ≤ 0.5 Autres : ≤ 0.3

Annexe 1-B : Les exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments tertiaires au Maroc [6].

Zone climatique réglementaire	TGBV	U des toitures exposées (W/m ² .K)	U des murs extérieur (W/m ² .K)	U des vitrages (W/m ² .K)	R minimale des planchers sur sol (m ² .K/W)	Facteur Solaire FS* des vitrages
	≤ 15%	≤ 0.75	≤ 1.20	≤ 5.80	NE (pas d'exigence)	NE
Z1 (Réf. Agadir)	16-25%	≤ 0.65	≤ 1.20	≤ 5.80	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.65	≤ 1.20	≤ 3.30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0.5
	36-45%	≤ 0.55	≤ 1.20	≤ 3.30	NE	Nord : ≤ 0.7 Autres : ≤ 0.3
	≤ 15%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 5.80	NE	NE
Z2 (Réf. Tanger)	16-25%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.65	≤ 0.60	≤ 3.30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0.5
	36-45%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 2.60	NE	Nord : ≤ 0.7 Autres : ≤ 0.3
	≤ 15%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 0.75	NE
Z3 (Réf. Fès)	16-25%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 0.75	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.55	≤ 0.70	≤ 2.60	≥ 0.75	Nord : NE Autres : ≤ 0.5
	36-45%	≤ 0.49	≤ 0.60	≤ 1.90	≥ 0.75	Nord : ≤ 0.7 Autres : ≤ 0.5
	≤ 15%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 3.30	≥ 1.25	NE
Z4 (Réf. Ifrane)	16-25%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 3.30	≥ 1.25	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.49	≤ 0.60	≤ 2.60	≥ 1.25	Nord : ≤ 0.7 Autres : ≤ 0.6
	36-45%	≤ 0.49	≤ 0.55	≤ 1.90	≥ 1.25	Nord : ≤ 0.6 Autres : ≤ 0.5
	≤ 15%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 1.00	NE
Z5 (Réf. Marrakech)	16-25%	≤ 0.65	≤ 0.70	≤ 3.30	≥ 1.00	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 2.60	≥ 1.00	Nord : ≤ 0.6 Autres : ≤ 0.4
	36-45%	≤ 0.49	≤ 0.55	≤ 1.90	≥ 1.00	Nord : ≤ 0.5 Autres : ≤ 0.3
	≤ 15%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 1.00	NE
Z6 (Réf. Errachidia)	16-25%	≤ 0.65	≤ 0.70	≤ 3.30	≥ 1.00	Nord : NE Autres : ≤ 0.7
	26-35%	≤ 0.55	≤ 0.60	≤ 2.60	≥ 1.00	Nord : ≤ 0.6 Autres : ≤ 0.4
	36-45%	≤ 0.49	≤ 0.55	≤ 1.90	≥ 1.00	Nord : ≤ 0.5 Autres : ≤ 0.3
	≤ 15%	≤ 0.65	≤ 0.80	≤ 3.30	≥ 1.00	NE

Annexe 2 : Caractéristiques intrinsèques de certaines lampes [310].

Type de lampe	Puissance (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité lumineuse (lm/W)	Durée de vie (h)
Lampes à incandescence classique	25 - 100	200 - 1900	05 - 19	1000
Lampes à incandescence halogènes	05 - 500	50 - 100000	10 - 12	2000 - 5000
Tubes fluorescents	15 - 58	1300 - 5000	60 - 105	8000 - 12000
Lampes économiques ou lampes fluo-compactes (CFL)-ballast Intégré	03 - 23	100 - 6000	35 - 80	6000 - 10000
Lampes économiques ou lampes fluo-compactes (CFL)-ballast externe	05 - 80			8000 - 16000
Diodes électroluminescentes (DEL)	0.007 - 15	1.5 - 400	20 - 30	5000 - 100000

Annexe 3-A : Les variables de conception utilisées dans la littérature.

Auteurs	Outils d'optimisation	Outils de simulation	Fonctions objectif	Champ d'application	B _g	B _a	U _{M,e}	α _M	U _T	α _T	U _p	Pt	U _{M,i}	P-type	W-size	U _g	SHGC	ε	T-s	R-s	T-v	W-sh	W-o	W-o,c	U _f	α _f	WWR	Air-m,f	ACH	
Bre et al. (2020) [311]	NSGA-II	EnergyPlus + Python	Besoins énergétiques + Confort thermique	Bâtiments résidentiels		V _D	V _D	V _C	V _D		V _D		V _D		V _C	V _D	V _C	V _C					V _C							
Zhai et al. (2019) [312]	NSGA-II	EnergyPlus	Besoins énergétiques + Confort thermique + Confort visuel	Bâtiments de bureaux		V _D										V _D							V _C							
Shi et al. (2018) [313]	Sampling	DeST	Besoins énergétiques	Bâtiments de bureaux			V _C		V _C																					
Papadopoulos et al. (2018) [314]	Machine learning (Gradient Boosted Regression Trees) + GA	Ecotect	Besoins énergétiques	Bâtiments		V _C	V _C		V _C																				V _C	
Yao et al. (2018) [315]	Inconnu	EnergyPlus + Microsoft Visual Basic	Besoins énergétiques + Confort thermique	Bâtiments résidentiels		V _C	V _D		V _D		V _D												V _C					V _C		V _C
Bamdad et al. (2018) [316]	ACOMV-M + PSOHJ	EnergyPlus + GenOpt	Besoins énergétiques	Bâtiments de bureaux			V _C									V _D	V _D				V _D	V _C								
Gou et al. (2018) [317]	ANN + NSGA-II + Monte Carlo method	EnergyPlus + MATLAB® + SIMLAB	Besoins énergétiques + Confort thermique	Bâtiments résidentiels		V _C	V _C	V _C	V _C	V _C				V _D		V _C	V _C					V _C	V _C	V _D				V _C	V _C	
Li et al. (2017) [190]	ANN + NSGA-II + MOPSO + MOGA + MODE	TRNSYS + EnergyPlus + DOE-2 + MATLAB® + GenOp	Besoins énergétiques + Coût du cycle de vie + Émissions de CO ₂ + Confort thermique	Bâtiments résidentiels		V _C	V _D		V _D		V _D		V _D			V _C				V _C								V _C		
Mostavi et al. (2017) [318]	Harmony search algorithm	EnergyPlus + C++	Coût du cycle de vie + Émissions du cycle de vie + Confort thermique	Bâtiments de bureaux			V _C		V _C		V _C					V _D														
Zhang et al. (2017) [319]	GA (SPEA-2)	Rhinoceros + EnergyPlus + Radiance + Octopus	Besoins énergétiques + Éclairage naturel + Confort thermique	Bâtiments scolaires		V _C	V _C		V _C		V _C					V _D	V _D				V _D	V _D						V _C		
Bre et al. (2017) [320]	NSGA-II	EnergyPlus + Python	Besoins énergétiques + Confort thermique	Bâtiments résidentiels		V _C	V _D	V _C	V _D		V _D		V _D		V _C	V _D	V _C	V _C					V _C							

Avec :

ACH : Taux de renouvellement de l'air en [v.h⁻¹].

Air-m,f : Coefficient de débit massique de l'air en [kg.s⁻¹.m⁻¹].

B_a : Azimut du bâtiment en [°].

B_g : Géométrie du bâtiment [-].

α_T : Coefficient d'absorption du rayonnement solaire de la toiture [-].

α_f : Coefficient d'absorption du rayonnement solaire des cadres [-].

α_M : Coefficient d'absorption du rayonnement solaire des murs extérieurs [-].

ε : Emissivité [-].

P-type : Type de mur [-].

Pt : Coefficient linéaire des ponts thermiques en [W.m⁻¹.K⁻¹].

R-s : Réflexion solaire [-].

SHGC : Coefficient de gain de chaleur solaire [-].

Annexe 3-B : Les variables de conception utilisées dans la littérature.

Auteurs	Outils d'optimisation	Outils de simulation	Fonctions objectif	Champ d'application	B _g	B _a	U _{M,e}	α _M	U _T	α _T	U _p	Pt	U _{M,i}	P-type	W-size	U _g	SHGC	ε	T-s	R-s	T-v	W-sh	W-o	W-o,c	U _f	α _f	WWR	Air-m,f	ACH	
Harmathy et al. (2016) [321]	Optimisation multicritères de l'enveloppe des bâtiments	EnergyPlus + Radiance + Autodesk Revit + Open Studio	Besoins énergétiques + Confort visuel	Bâtiments de bureaux												V _D	V _D				V _D							V _C		
Bre et al. (2016) [84]	GA + Méthode de dépistage de Morris pour analyse de sensibilité	EnergyPlus + Python	Besoins énergétiques + Confort thermique	Bâtiments résidentiels		V _C	V _C	V _C	V _C	V _C	V _C		V _C			V _D	V _C	V _C					V _C							
Delgarm et al. (2016) [188]	MOPSO	EnergyPlus + MATLAB® + jEPlus	Besoins énergétiques	Bâtiments de bureaux		V _C	V _C	V _D								V _C			V _D		V _D	V _C					V _C			
Delgarm et al. (2016) [189]	NSGA-II	EnergyPlus + MATLAB® + jEPlus	Besoins énergétiques	Bâtiments de bureaux		V _C										V _C						V _C					V _C			
Azari et al. (2016) [322]	ANN + MOGA	eQuest	Impacts environnementaux du cycle de vie	Bâtiments de bureaux			V _C									V _D			V _D			V _C								
Brown et al. (2016) [323]	NSGA-II	Archsim + EnergyPlus	Besoins énergétiques	Bâtiments de grande hauteur	V _C																									
Echenagucia et al. (2015) [324]	NSGA-II	EnergyPlus + Python	Besoins énergétiques	Bâtiments de bureaux												V _D	V _D				V _D									
Romani et al. (2015) [325]	Plans d'expériences (D-optimal) + Métamodèles	TRNSYS	Besoins énergétiques	Bâtiments résidentiels			V _C	V _C	V _C	V _C	V _C	V _C				V _D	V _D		V _D	V _D	V _D	V _C								V _C
Yu et al. (2015) [326]	ANN + NSGA-II	EnergyPlus + MATLAB®	Besoins énergétiques + Confort thermique	Bâtiments résidentiels		V _C	V _C									V _C											V _C			
Yang et al. (2014) [327]	NSGA-II	EnergyPlus	Besoins énergétiques	Bâtiments résidentiels												V _C						V _C								V _C

T-s : Transmission solaire [-].

T-v : Transmission visuelle [-].

U_{M,e} : Coefficient de transmission des murs extérieurs en [W.m⁻².K⁻¹].

U_{M,i} : Coefficient de transmission des murs intérieurs en [W.m⁻². K⁻¹].

U_T : Coefficient de transmission de la toiture en [W.m⁻².K⁻¹].

U_p : coefficient de transmission du plancher en [W.m⁻².K⁻¹].

U_f : Coefficient de transmission des cadres en [W.m⁻².K⁻¹].

U_g : Coefficient de transmission du vitrage en [W.m⁻².K⁻¹].

W-o : Facteur d'ouverture des fenêtres en [%].

W-o,c : Type de commande d'ouverture des fenêtres [-].

W-sh : Ombrage de la fenêtre [-].

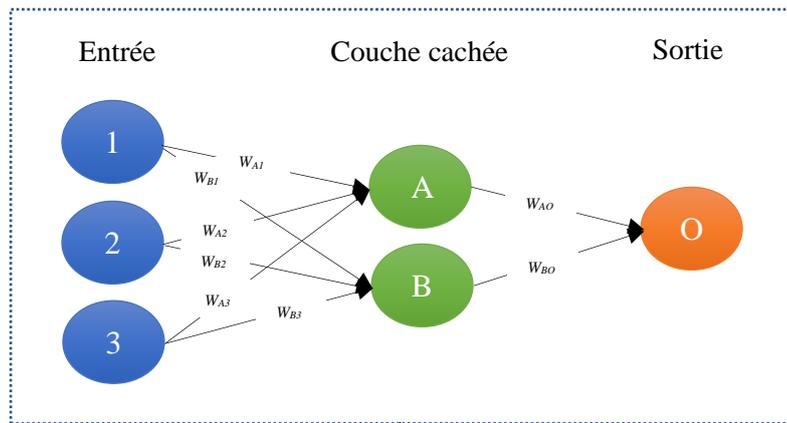
W-size : Taille de la fenêtre en [m²] ou [m].

WWR : Rapport fenêtre/mur en [%].

Annexe 4 : Brève littérature scientifique sur l'optimisation à base de modèles de substitution pour la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique.

ID	Auteurs	Performances optimisées	Champ d'application	Type de modèle de substitution	Variables de conception (Inputs)	Fonctions objectif (Outputs)	Algorithme d'optimisation	Outils de simulation	Nombre d'échantillons
[286]	Chegari et al. [2022]	Confort thermique - Consommation d'énergie	Bâtiments résidentiels	ANN	11	2	MOPSO	TRNSYS	35
[328]	Bamdad et al. [2020]	Consommation d'énergie	Bâtiments de bureaux	ANN	15	1	Active learning : Sampling	EnergyPlus	2000
[311]	Bre et al. [2020]	Confort thermique - Consommation d'énergie	Bâtiments résidentiels	ANN	12	2	NSGA-II	EnergyPlus	100/6400
[329]	Gonçalves et al. [2020]	Confort thermique - Consommation d'énergie - Température de l'air ambiant	Bâtiments de bureaux	ANN	6	4	PSO	EnergyPlus	35040
[330]	Wortmann et al. [2019]	Consommation d'énergie - Structure - Lumière du jour	Bâtiments de bureaux	RBF	4-40	3	SGA, GA, RBFOpt, DIRECT, SBPLEX, CMAES, SA, PSO, CRS2, HypE	EnergyPlus	500
[331]	Chen et al. [2018]	Consommation d'énergie	Bâtiments résidentiels	SVM	10	1	NSGA-II	EnergyPlus	5610
[332]	Prada et al. [2018]	Consommation d'énergie	Bâtiments	RBF, Gaussian processes, Linear regression, MARS and SVM	6	2	Meta-models	TRNSYS	50/27000
[333]	Nagpal et al. [2018]	Consommation d'énergie	Bâtiments résidentiels et de bureaux	ANN, Random forest	32	1	GA	EnergyPlus	50/400
[316]	Bamdad et al. [2018]	Consommation d'énergie	Bâtiments de bureaux	ANN	9	1	Ant Colony Optimisation algorithm	EnergyPlus	4000
[314]	Papadopoulos et al. [2018]	Consommation d'énergie	Bâtiments	Gradient boosted regression	8	2	GA	Ecotect	600
[334]	Maltais et al. [2017]	Indice d'éblouissement - Besoins en énergie pour l'éclairage	Bâtiments de bureaux	Linear regression	15	2	Meta-models	Daysim	1900
[335]	Chen et al. [2017]	Consommation d'énergie	Bâtiments résidentiels	Linear regression, MARS and SVM	9	3	NSGA-II	EnergyPlus	5610
[336]	Dhariwal et al. [2017]	Consommation d'énergie	Bâtiments de bureaux	Linear regression	26	6	GA, GSA+GA, GSA+SM+GA	EnergyPlus	113/193
[190]	Li et al. [2017]	Coût du cycle de vie - Émissions de CO ₂ - Confort thermique	Bâtiments résidentiels	ANN	16	3	NSGA-II, MOPSO, MOGA, MODE	TRNSYS / EnergyPlus / DOE-2	Non défini
[337]	Carreras et al. [2016]	Performance économique - Impact environnemental	Bâtiments	Linear regression	5	2	MONLP	EnergyPlus	7776
[338]	Gilan et al. [2016]	Consommation d'énergie	Bâtiments de bureaux	Gaussian processes	9	2	NSGA-II	EnergyPlus	300/1100
[339]	Xu et al. [2016]	Coût d'exploitation du bâtiment - Coût d'investissement initial	Bâtiments de bureaux	Linear regression	6	2	NSGA-II, aNSGA-II	EnergyPlus	>90
[340]	Brownlee et al. [2015]	Consommation d'énergie - Coût de la construction	Bâtiments de bureaux	RBF	50	3	NSGA-II	EnergyPlus	5000
[341]	Asadi et al. [2014]	Confort thermique - Consommation d'énergie - Coût de la rénovation	Bâtiments de bureaux	ANN	4	3	GA	TRNSYS	950
[342]	Gengembre et al. [2012]	Consommation d'énergie - Coût de construction - Coût énergétique - Coût du cycle de vie	Bâtiments	Gaussian processes	8	4	PSO	R5C1	150
[343]	Eisenhower et al. [2012]	Confort thermique - Consommation d'énergie	Bâtiments de bureaux	SVM	7-1009	2	Meta-models	EnergyPlus	5000
[130]	Stavarakakis et al. [2012]	Confort thermique	Bâtiments	RBF	2	1	Meta-models	Fluent (CFD)	63
[344]	Zemella et al. [2011]	Consommation d'énergie - Émissions de CO ₂	Bâtiments de bureaux	ANN	5	5	Evolutionary Neural Network Design	EnergyPlus	1500
[345]	Wong et al. [2010]	Consommation d'énergie	Bâtiments de bureaux	ANN	9	4	Meta-models	EnergyPlus	11315
[346]	Magnier et al. [2010]	Confort thermique - Consommation d'énergie	Bâtiments résidentiels	ANN	20	5	NSGA-II	TRNSYS	450

Annexe 5 : Procédure de l'algorithme de Garson pour l'analyse de sensibilité.



Extraction de données

$W_{A1} = \text{net.IW}(1,1)$
 $W_{A2} = \text{net.IW}(1,2)$
 $W_{A3} = \text{net.IW}(1,3)$
 $W_{B1} = \text{net.IW}(2,1)$
 $W_{B2} = \text{net.IW}(2,2)$
 $W_{B3} = \text{net.IW}(2,3)$
 $W_{AO} = \text{net.LW}(1,1)$
 $W_{BO} = \text{net.LW}(1,2)$

✓ Poids des connexions

Objet	Couche cachée A	Couche cachée B
Entrée 1	W_{A1}	W_{B1}
Entrée 2	W_{A2}	W_{B2}
Entrée 3	W_{A3}	W_{B3}
Sortie	W_{AO}	W_{BO}

✓ $C_{A1} = (W_{A1}) \cdot (W_{AO})$

Objet	Couche cachée A	Couche cachée B
Entrée 1	C_{A1}	C_{B1}
Entrée 2	C_{A2}	C_{B2}
Entrée 3	C_{A3}	C_{B3}

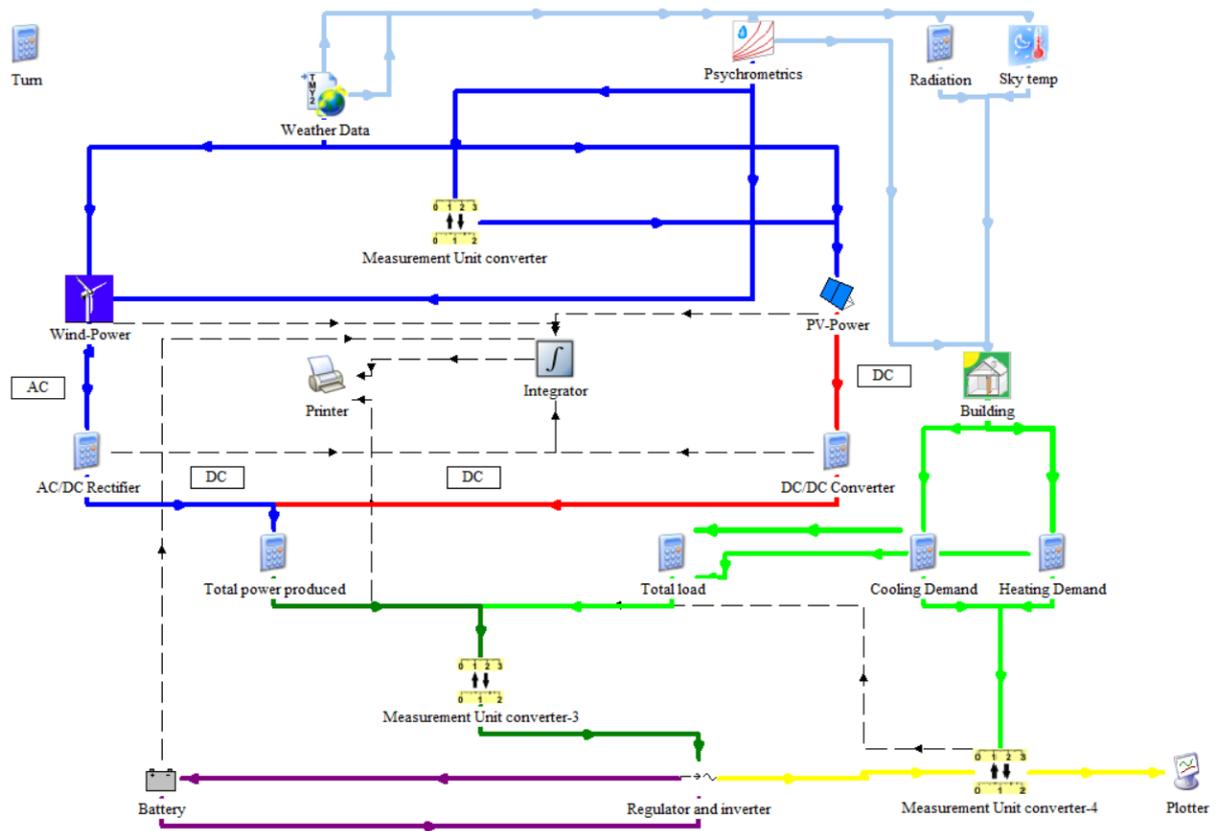
✓ $r_{A1} = |C_{A1}| / (|C_{A1}| + |C_{A2}| + |C_{A3}|)$

Objet	Couche cachée A	Couche cachée B	Somme
Entrée 1	r_{A1}	r_{B1}	S_1
Entrée 2	r_{A2}	r_{B2}	S_2
Entrée 3	r_{A3}	r_{B3}	S_3

✓ $R_{A1} = [S_1 / (S_1 + S_2 + S_3)] (100\%)$

Objet	Importance relative
Entrée 1	R_{A1}
Entrée 2	R_{A2}
Entrée 3	R_{A3}

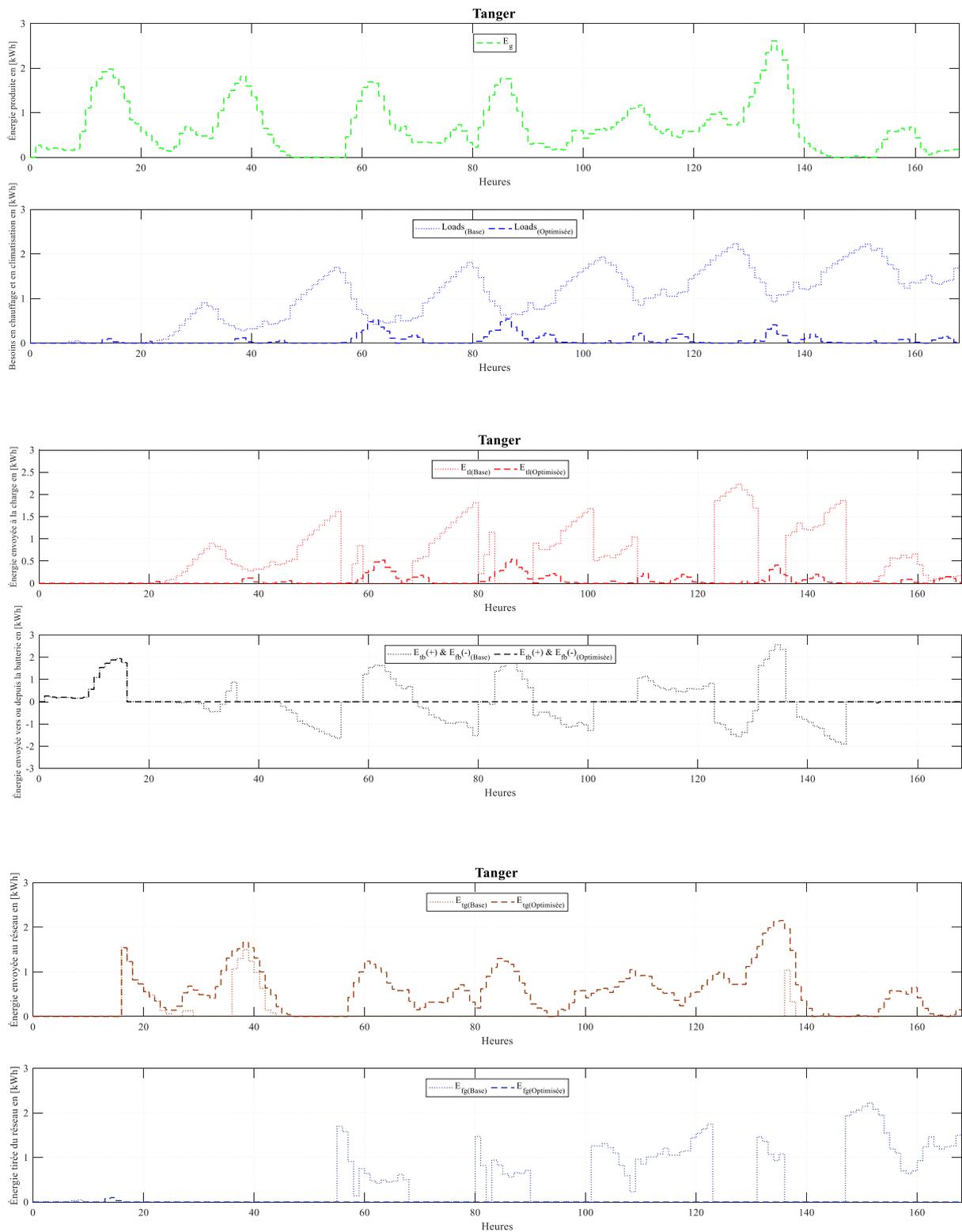
Annexe 6 : L'architecture du raccordement du bâtiment au système de production d'énergie local dans l'environnement TRNSYS.

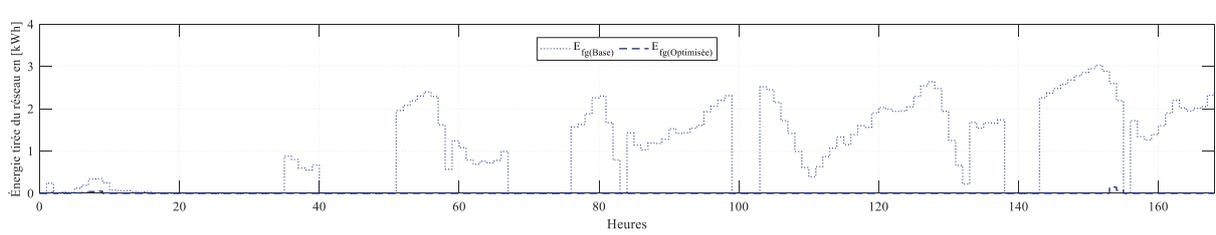
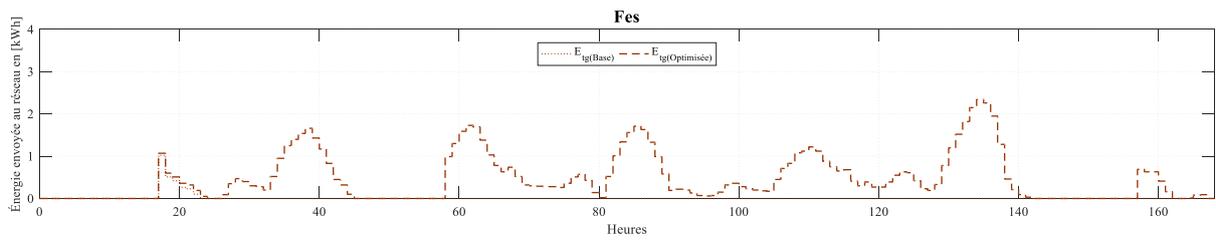
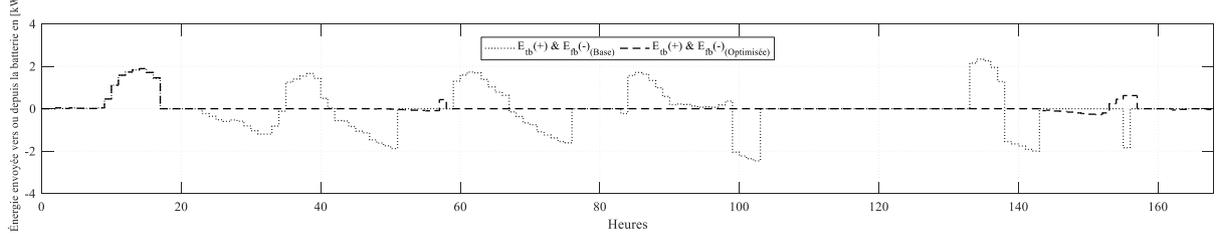
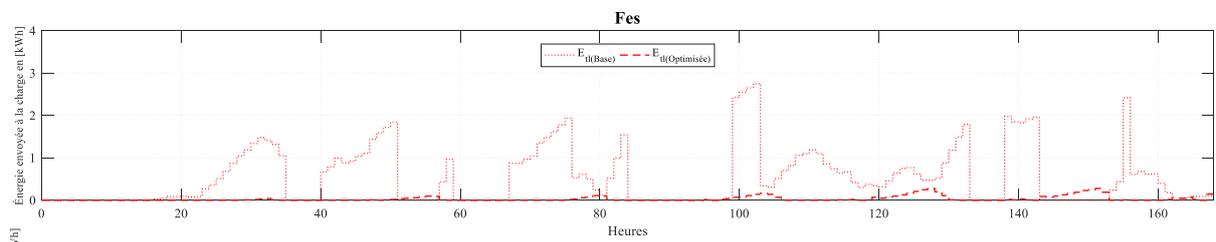
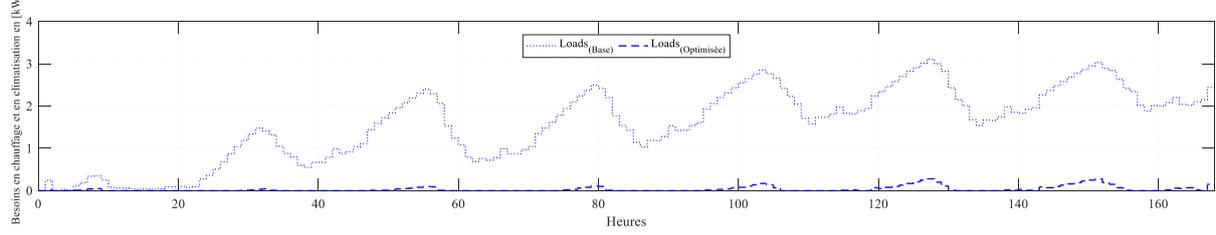
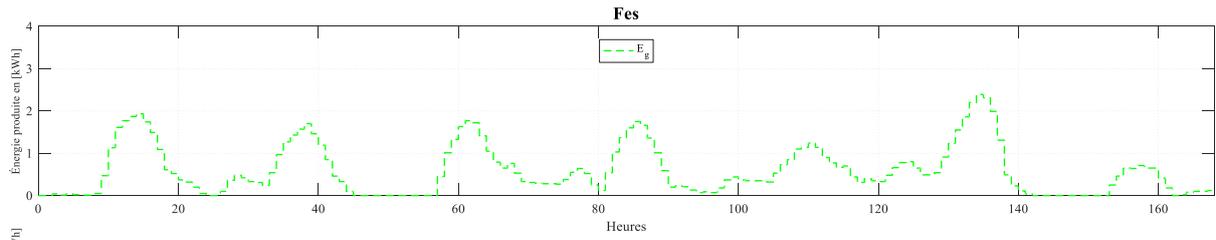


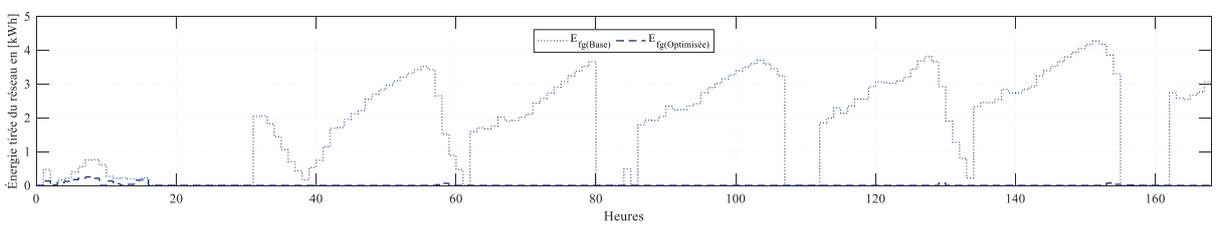
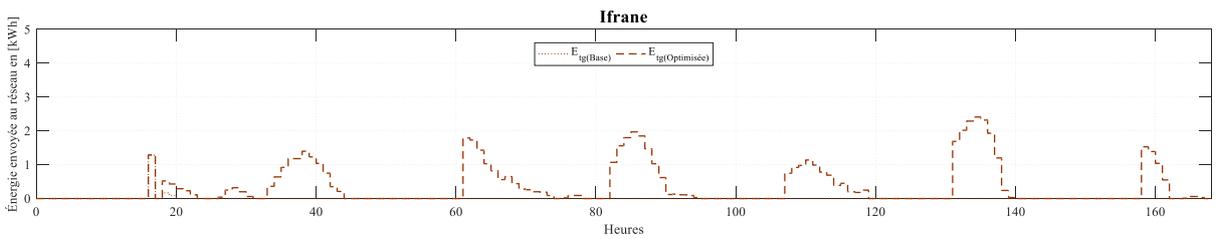
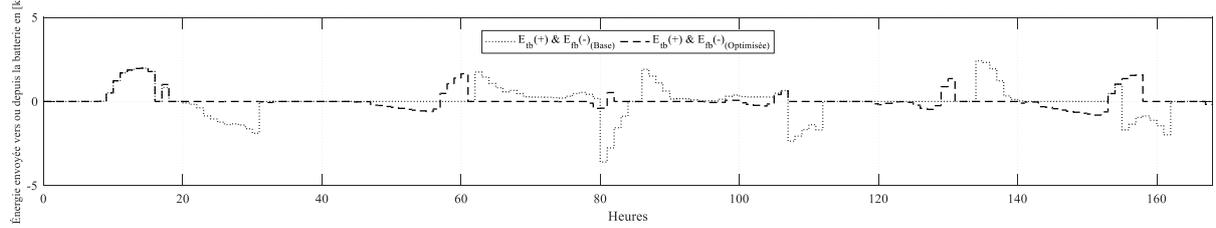
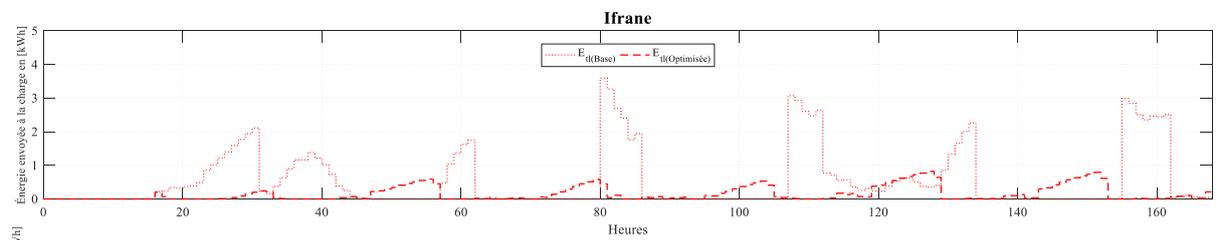
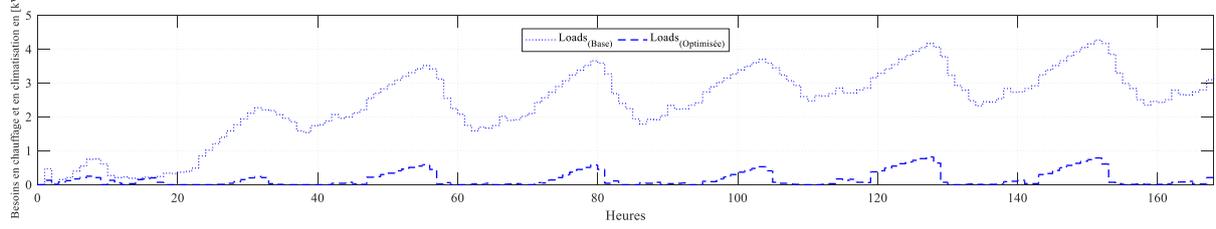
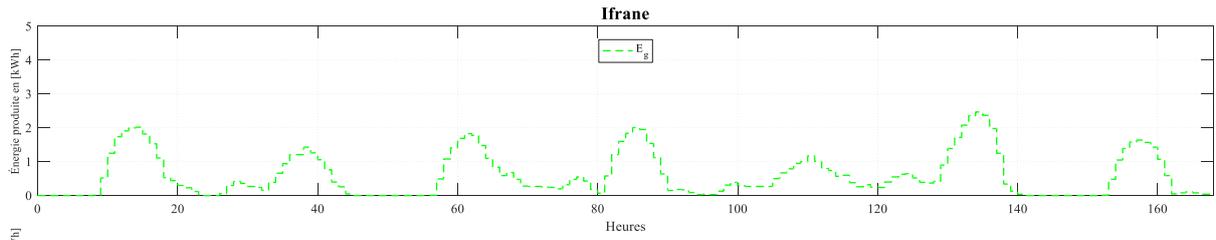
Annexe 7 : Les caractéristiques électriques des composants du système local de production d'énergie.

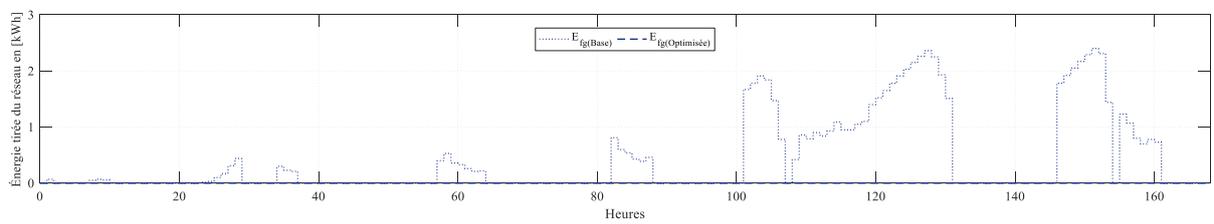
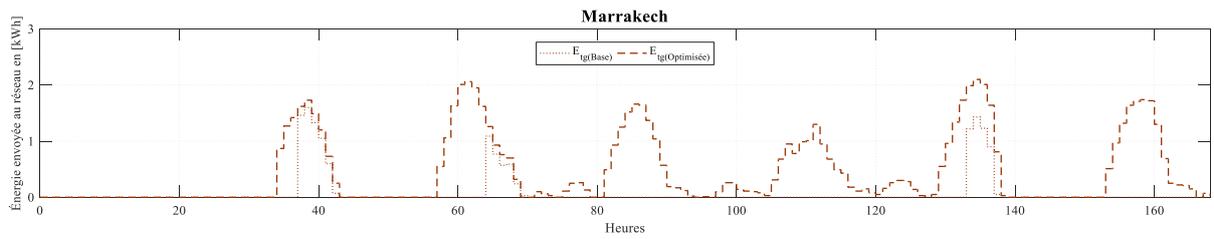
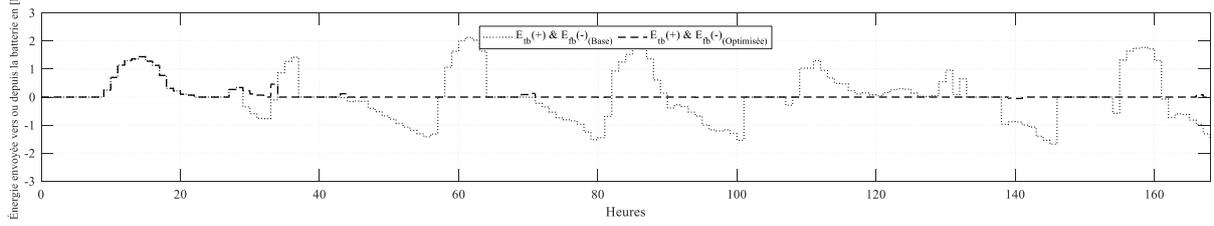
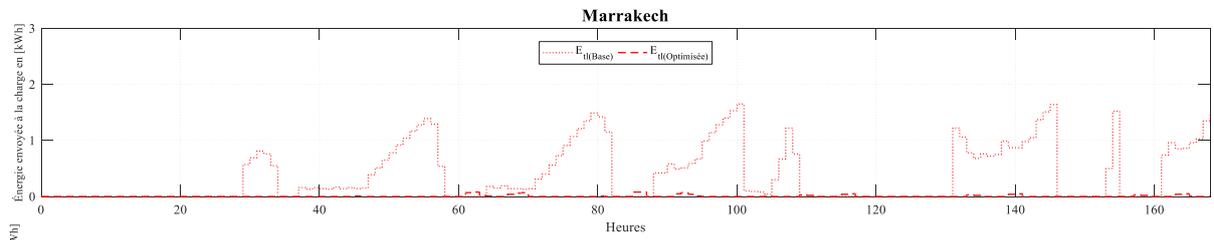
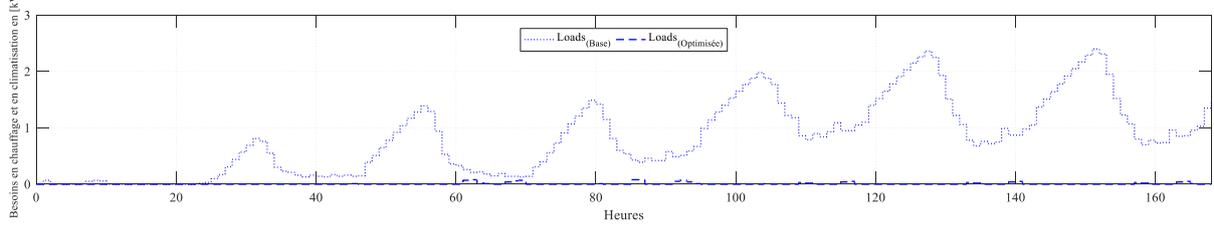
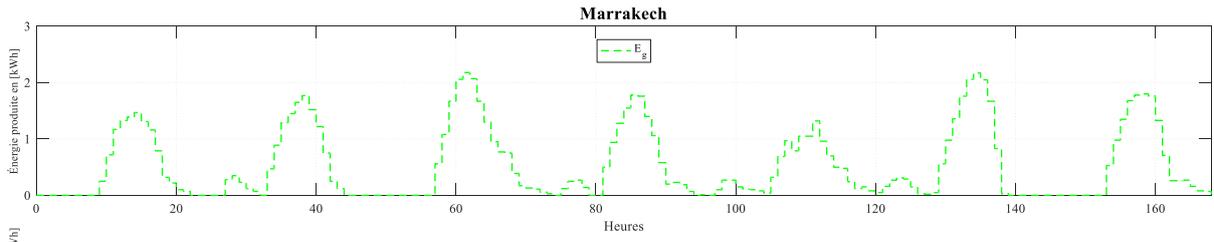
Module photovoltaïque		Générateur éolien		Batterie de stockage	
TS250-P156-60		KINGSPAN WIND KW3		GEL 12V 250Ah	
Puissance au point de puissance maximale P_{mp} (W)	250	Puissance nominale de la turbine P_w (kW)	3.2	Capacité énergétique C_b (kWh)	3
Tension de circuit ouvert V_{oc} (V)	37.4	Vitesse nominale du vent $V_{nom,p0}$ (m.s ⁻¹)	12	Efficacité η_{bat} (-)	0.98
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	8.65	Nombre de pales (-)	3	Régulateur	
Tension au point de puissance maximale V_{mp} (V)	30.3	Cut en (m.s ⁻¹)	3.5	MPPT VICTRON SMARTSOLAR 100/20	
Courant au point de puissance maximale I_{mp} (A)	8.26	Tensions disponibles	24V DC / 48V DC / 300V AC	Efficacité η_{reg} (-)	0.98
Efficacité de la conversion des modules η_{pv} (%)	15.27	Hauteur du moyeu Z_h (m)	11	Limite supérieure de la f_{soc} (-)	0.97
Surface de la cellule A_c (cm ²)	243.36	Perte de puissance des turbines ℓ (%)	6	Limite inférieure de la f_{soc} (-)	0.1
Surface du module A_m (m ²)	1.64	Diamètre du rotor D (m)	3.9	Onduleur DC/AC	
Nombre de cellules câblées en série n_c (-)	60	Densité de l'air ρ_0 (kg.m ⁻³)	1.225	GROWATT 18000UE	
Coefficient de température de I_{sc} (-)	0.0457	Hauteur de la collecte des données Z_{an} (m)	10	Efficacité η_{inv} (-)	0.98
Coefficient de température de V_{oc} (-)	-0.3538	Exposant de cisaillement du site α (-)	0.14		
Angle d'inclinaison β (Degree)	31-36	Pression barométrique P (kPa)	101.3		
Nombre de modules en série (-)	12	Altitude du site alt (m)	220		
Nombre de modules en parallèle (-)	1	Redresseur AC/DC			
Convertisseur DC/DC		TMO-KDPS-10KW			
350DNC40-24-xG		Efficacité η_{rec} (-)	0.86		
Efficacité η_{conv} (-)	0.92				

Annexe 8 : Variation des indicateurs d'évaluation de l'autosuffisance énergétique du bâtiment dans différentes zones climatiques.









Référence

- [1] M. Larsson, *Global energy transformation: Four necessary steps to make clean energy the next success story*. 2018.
- [2] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Renewable Energy: An Overview,” *CLEARINGHOUSE - Energy Efficiency and Renewable Energy*, vol. 6, Institution of Engineering and Technology, pp. 55–55, 2001.
- [3] Quamrul Haider, “Nuclear Fusion: Holy Grail of Energy,” *IntechOpen*, vol. 15, no. 1, p. 13, 2019.
- [4] UNEP SBCI, *Buildings and climate change - Summary for Decision-Makers*. 2013.
- [5] Department of Housing and Urban Policy, “BUILDINGS & ENERGY EFFICIENCY.” [Online]. Available: http://www.mhmv.gov.ma/?page_id=3605. [Accessed: 01-Jan-2021].
- [6] AMEE_R, *Règlement thermique de construction au Maroc (RTCM)*, vol. 91. 2015.
- [7] IEA, “Key World Energy Statistics 2021,” *Int. Energy Agency*, 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>.
- [8] IEA, *Energy Policies Beyond IEA Countries - Morocco*. 2019.
- [9] S. V Skalko *et al.*, *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013 : Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, vol. 2013. 2013.
- [10] ISO, *ISO 50001 : Systèmes de management de l'énergie*. 2018.
- [11] ISO, *International Standard : ISO 7730:2005 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, 3rd ed., vol. 2007. 2005.
- [12] ISO 7730, *Ergonomie des ambiances thermiques — Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*. 2005.
- [13] NF EN 15232, *Energy Performance of Buildings - Energy performance of buildings - Part 1: Impact of Building Automation, Controls and Building Management - Modules*. 2017.
- [14] NF EN 16247, *NF EN 16247 : Audits énergétiques*. 2014.
- [15] J. Huang and J. Deringer, “Status of Energy Efficient Building Codes in Asia (China, Hong Kong, Taiwan, Japan, Korea, Malaysia, Philippines, Singapore, Thailand, India),” pp. 1–65, 2007.
- [16] C. Richerzhagen, T. Frieling, N. Hansen, A. Minnaert, N. Netzer, and J. Rußbild, *Energy efficiency in buildings in China: Policies, barriers and opportunities*, vol. 41. 2008.
- [17] ECBC, *Energy Conservation Building Code 2017*. 2017.
- [18] M. Evans, B. Shui, and S. Somasundaram, *Country Report on Building Energy Codes in India*, no. April. 2009.
- [19] EEBS In Japan, “Energy efficiency building standards in Japan,” vol. 1995, pp. 1–14, 2007.
- [20] NRC, “National Energy Code of Canada for Buildings,” *Can. Comm. Build. Fire Codes*, 2017.
- [21] RT, *Réglementation thermique 2012: un saut énergétique pour les bâtiments neufs*. 2012.
- [22] ENEA, “DECRETO LEGISLATIVO 3 marzo 2011, n. 28 Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. (11G0067) (GU Serie Generale n.71,” vol. 1, no. c, pp. 1–93, 2011.
- [23] A. de energía CTE, *Documento Básico HE*, vol. 2013. 2013.
- [24] D.T.R. C 3-2, *Réglementation thermique des bâtiments d'habitation : règles de calcul des déperditions calorifiques DTR C 3-2*. 1997.
- [25] D.T.R. C 3-4, *Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments*. 1998.
- [26] ANME, “Arrêté du 23 juillet 2008 pour les constructions à usage de bureau,” 2008. [Online]. Available: <http://www.anme.tn/>.

- [27] ANME, “Arrêté 1er juin 2009 pour les bâtiments à usage résidentiel,” 2009. [Online]. Available: <http://www.anme.tn/>.
- [28] J. Villot, N. Gondran, and V. Laforest, “Labels de la construction : quelle contribution possible au facteur 4 ?,” *Développement durable Territ.*, vol. 2, no. Vol. 2, n° 1, pp. 0–30, 2011.
- [29] B. G. Henderson, *SAP 2012 : The Government’s Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings*, vol. 14, no. 1. 2012.
- [30] ADEME, *Climat, Air et Énergie*. 2015.
- [31] PREBAT, *Rapport final : COMPARAISON INTERNATIONALE BATIMENT ET ENERGIE*. 2007.
- [32] P. Blazy and A.-C. Giumelli, “Effinergie : Dossier De Presse,” in *Mars*, 2012.
- [33] Effinergie, “REGLES TECHNIQUES LABEL EFFINERGIE +,” 2014, pp. 2–7.
- [34] B. Effinergie, *Les bâtiments Effinergie+ et Bepos Effinergie 2013*. 2013.
- [35] Céquami, “HPE Rénovation,” 2014.
- [36] J.-C. R. Philippe Tessier, Michel Irigoien, “Bâtiments Basse Consommation,” p. 32.
- [37] BO, “ROYAUME DU MAROC : Bulletin Officiel,” vol. 1438, p. 103, 2014.
- [38] AMEE-H, *Guide technique pour le chauffage, la ventilation et la climatisation*. 2014.
- [39] BO, “ROYAUME DU MAROC : Bulletin Officiel,” vol. 1441, p. 39, 2020.
- [40] R. Gonzalo and K. J. Habermann, *Architecture et efficacité énergétique : Principes de conception et de construction*. DE GRUYTER, 2008.
- [41] A. Liébard and A. De Herde, *Traité d’architecture et d’urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. 2006.
- [42] S. B. Sadineni, S. Madala, and R. F. Boehm, “Passive building energy savings: A review of building envelope components,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3617–3631, 2011.
- [43] L. Chesné, “Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques,” 2012.
- [44] N. Aste, A. Angelotti, and M. Buzzetti, “The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings,” *Energy Build.*, vol. 41, no. 11, pp. 1181–1187, 2009.
- [45] H. Akbari, H. Damon Matthews, and D. Seto, “The long-term effect of increasing the albedo of urban areas,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, no. 2, 2012.
- [46] M. G. Alpuche, I. González, J. M. Ochoa, I. Marincic, A. Duarte, and E. Valdenebro, “Influence of absorptance in the building envelope of affordable housing in warm dry climates,” *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1842–1850, 2014.
- [47] R. Lapisa, E. Bozonnet, M. O. Abadie, and P. Salagnac, “Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact,” *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 192–208, Oct. 2013.
- [48] IC, “Daily Observational Data Map | GIS Maps | National Centers for Environmental Information (NCEI),” 2021. [Online]. Available: <https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/cdo/daily>. [Accessed: 11-Feb-2021].
- [49] P. D. Robinson and M. G Hutchins, “Advanced glazing technology for low energy buildings in the UK,” *Renew. Energy*, vol. 5, no. 1–4, pp. 298–309, 1994.
- [50] F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, and S. Lassue, “Modeling a triple-glazed supply-air window,” *Build. Environ.*, vol. 84, pp. 1–9, 2015.
- [51] B. P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey, and R. Hart, “Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 96, no. 1, pp. 1–28, 2012.
- [52] B. Chegari, M. Tabaa, E. Simeu, F. Moutaouakkil, and H. Medromi, “Glazing’s Potential Energy Savings for Green Buildings,” in *Advances on Smart and Soft Computing*, Springer, 2022, pp.

- [53] E. Cuce, P. M. Cuce, and S. Riffat, “Novel glazing technologies to mitigate energy consumption in low-carbon buildings: a comparative experimental investigation,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 40, no. 4, pp. 537–549, Mar. 2016.
- [54] K. Tsikaloudaki, K. Laskos, T. Theodosiou, and D. Bikas, “The energy performance of windows in Mediterranean regions,” *Energy Build.*, vol. 92, pp. 180–187, 2015.
- [55] A. Gustavsen, S. Grynninga, D. Arasteh, B. P. Jelle, and H. Goudey, “Key elements of and material performance targets for highly insulating window frames,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 10, pp. 2583–2594, 2011.
- [56] R. G. B. Mitchell, “PVC Window Manufacture,” in *Developments in Plastics Technology—1*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1982, pp. 155–194.
- [57] H. Ge, V. R. McClung, and S. Zhang, “Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study,” *Energy Build.*, vol. 60, pp. 163–173, 2013.
- [58] J. J. Bonerandi and S. Hesse, *La protection solaire pour des bâtiments durables et a basse consommation*, 2nd ed., vol. 42, no. 9. 2018.
- [59] L. Bellia, F. De Falco, and F. Minichiello, “Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 54, no. 1, pp. 190–201, 2013.
- [60] S. Grynning, B. Time, and B. Matusiak, “Solar shading control strategies in cold climates - Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces,” *Sol. Energy*, vol. 107, no. 7465, pp. 182–194, 2014.
- [61] B. Chegari, M. Tabaa, F. Moutaouakkil, E. Simeu, and H. Medromi, “Shading Devices’ Benefits on Thermal Comfort and Energy Performance of a Residential Building in Different Climates in Morocco,” 2020, pp. 1094–1111.
- [62] F. Allard, “Natural ventilation in buildings: a design handbook,” *London James James*, p. 378, 1998.
- [63] M. Orme, M. Liddament, and A. Wilson, *Numerical Data for Air Infiltration and Natural Ventilation Calculations*, vol. 44. Air Infiltration and Ventilation Centre Coventry, UK, 1994.
- [64] M. Russell, M. Sherman, and A. Rudd, “Review of residential ventilation technologies,” *HVAC R Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 325–348, 2007.
- [65] P. HAUT, *Chauffage, isolation et ventilation écologiques*. 2011.
- [66] E. Juodis, “Extracted ventilation air heat recovery efficiency as a function of a building’s thermal properties,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 6, pp. 568–573, 2006.
- [67] A. Mardiana-Idayu and S. B. Riffat, “Review on heat recovery technologies for building applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 2, pp. 1241–1255, 2012.
- [68] B. GARBAY, *Présentation des différentes l’efficacité d’un échangeur double méthodes de détermination de flux*, no. 33. 2011.
- [69] DREALL, “La ventilation dans les bâtiments,” in *Direction régionale de l’Environnement de l’Aménagement et du Logement du Limousin*, 2012, p. 11.
- [70] M. Santamouris and P. Wouters, “Advanced Components for Ventilation by WF de Gids,” in *Building Ventilation*, Routledge, 2006, pp. 283–298.
- [71] Y. Ji, K. J. Lomas, and M. J. Cook, “Hybrid ventilation for low energy building design in south China,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 11, pp. 2245–2255, 2009.
- [72] F. Chlela, A. Husaunndee, P. Riederer, and C. Inard, “Numerical evaluation of earth to air heat exchangers and heat recovery ventilation systems,” *Int. J. Vent.*, vol. 6, no. 1, pp. 31–42, 2007.
- [73] H. Bouhess, H. Hamdi, B. Benhamou, A. Bennouna, P. Hollmuller, and K. Limam, “Dynamic simulation of an earth-to-air heat exchanger connected to a villa type house in marrakech,” *Proc. BS 2013 13th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc.*, pp. 1063–1070, 2013.
- [74] ADEME, “Puits climatiques,” *Les Fiches Tech. L’Ademe*, p. 3, 2012.

- [75] C. Ghiaus and F. Allard, “Potential for free-cooling by ventilation,” *Sol. Energy*, vol. 80, no. 4, pp. 402–413, 2006.
- [76] afe, “La transition éclairagiste, une chance pour la France,” pp. 16–17, 2013.
- [77] G. DUBREUIL and A. GIRAUD, *Calculs pratiques de plomberie sanitaire*. 2008.
- [78] J. DESMONS, *Aide-mémoire : Génie climatique*, 3rd ed. Dunod, 2014.
- [79] P. Amet, G. Gourdon, Y. Guern, R. Jules, E. Marguet, and F. Mykieta, *Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire*, 2nd ed. Eyrolles, 2010.
- [80] A. Labouret, P. Cumunel, J.-P. Braun, and B. Faraggi, *Cellules solaires - 5ème édition - Les bases de l'énergie photovoltaïque*. 2010.
- [81] M. D. McKay, “Sensitivity and Uncertainty Analysis Using a Statistical Sample of Input Values,” *Uncertain. Anal.*, pp. 145–186, 1988.
- [82] C. J. Hopfe, “Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization,” 2009.
- [83] T. Laine, F. Fornas-Samso, P. Katranuschkov, R. Hoch, and P. Freudenberg, “Application of multi-step simulation and multi-eKPI sensitivity analysis in building energy design optimization,” in *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction-Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling, ECPPM 2014*, 2015, pp. 799–804.
- [84] F. Bre, A. S. Silva, E. Ghisi, and V. D. Fachinotti, “Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm,” *Energy Build.*, vol. 133, pp. 853–866, Dec. 2016.
- [85] S. Salimi, M. Mawlana, and A. Hammad, “Performance analysis of simulation-based optimization of construction projects using High Performance Computing,” *Autom. Constr.*, vol. 87, no. October 2017, pp. 158–172, Mar. 2018.
- [86] T. Hemker, K. R. Fowler, M. W. Farthing, and O. von Stryk, “A mixed-integer simulation-based optimization approach with surrogate functions in water resources management,” *Optim. Eng.*, vol. 9, no. 4 SPEC. ISS., pp. 341–360, 2008.
- [87] A. Nguyen, S. Reiter, and P. Rigo, “A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1043–1058, 2014.
- [88] D. Tuhus-Dubrow and M. Krarti, “Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 7, pp. 1574–1581, Jul. 2010.
- [89] J.-T. Jin and J.-W. Jeong, “Optimization of a free-form building shape to minimize external thermal load using genetic algorithm,” *Energy Build.*, vol. 85, pp. 473–482, Dec. 2014.
- [90] K. Horikoshi, R. Ooka, and J. Lim, “Building Shape Optimization for Sustainable Building Design-part (1) investigation into the relationship among building shape, zoning plans, and building energy consumption,” no. 1, pp. 4–6, 2012.
- [91] Y. K. Yi and A. M. Malkawi, “Optimizing building form for energy performance based on hierarchical geometry relation,” *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 6, pp. 825–833, Oct. 2009.
- [92] T. Rakha and K. Nassar, “Genetic algorithms for ceiling form optimization in response to daylight levels,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 2348–2356, Sep. 2011.
- [93] R. C. G. M. Loonen, M. Trčka, and J. L. M. Hensen, “Exploring the potential of climate adaptive building shells,” *Proc. Build. Simul. 2011 12th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc.*, vol. 2011, no. November 2011, pp. 2148–2155, 2011.
- [94] X. Shi and W. Yang, “Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects,” *Autom. Constr.*, vol. 32, pp. 125–135, Jul. 2013.
- [95] M. Turrin, P. von Buelow, and R. Stouffs, “Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 25, no. 4, pp. 656–675, Oct. 2011.
- [96] X. Marsault, “A multiobjective and interactive genetic algorithm to optimize the building form

- in early design stages,” *Proc. BS 2013 13th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc.*, pp. 809–816, 2013.
- [97] H. Yi, R. S. Srinivasan, and W. W. Braham, “An integrated energy–energy approach to building form optimization: Use of EnergyPlus, energy analysis and Taguchi-regression method,” *Build. Environ.*, vol. 84, pp. 89–104, Jan. 2015.
- [98] W. Wang, H. Rivard, and R. Zmeureanu, “Floor shape optimization for green building design,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 20, no. 4, pp. 363–378, Oct. 2006.
- [99] R. Ouarghi and M. Krarti, “Building shape optimization using neural network and genetic algorithm approach,” *Ashrae Trans*, vol. 112, pp. 484–491, 2006.
- [100] E. Rodrigues, A. R. Gaspar, and Á. Gomes, “Improving thermal performance of automatically generated floor plans using a geometric variable sequential optimization procedure,” *Appl. Energy*, vol. 132, pp. 200–215, Nov. 2014.
- [101] J. H. Kämpf and D. Robinson, “Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 6, pp. 807–814, Jun. 2010.
- [102] Y. K. Yi and H. Kim, “Agent-based geometry optimization with Genetic Algorithm (GA) for tall apartment’s solar right,” *Sol. Energy*, vol. 113, pp. 236–250, Mar. 2015.
- [103] M. Bojić, M. Miletić, and L. Bojić, “Optimization of thermal insulation to achieve energy savings in low energy house (refurbishment),” *Energy Convers. Manag.*, vol. 84, pp. 681–690, Aug. 2014.
- [104] X. Shi, “Design optimization of insulation usage and space conditioning load using energy simulation and genetic algorithm,” *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1659–1667, Mar. 2011.
- [105] M. Hamdy, A. Hasan, and K. Siren, “Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 1, pp. 109–123, Jan. 2011.
- [106] M. Fesanghary, S. Asadi, and Z. W. Geem, “Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm,” *Build. Environ.*, vol. 49, pp. 245–250, Mar. 2012.
- [107] Y.-H. Lin, K.-T. Tsai, M.-D. Lin, and M.-D. Yang, “Design optimization of office building envelope configurations for energy conservation,” *Appl. Energy*, vol. 171, pp. 336–346, Jun. 2016.
- [108] F. Kuznik, J. P. Arzamendia Lopez, D. Baillis, and K. Johannes, “Phase change material wall optimization for heating using metamodeling,” *Energy Build.*, vol. 106, pp. 216–224, Nov. 2015.
- [109] Y. Schwartz, R. Raslan, and D. Mumovic, “Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study,” *Energy*, vol. 97, pp. 58–68, Feb. 2016.
- [110] B. Lartigue, B. Lasternas, and V. Loftness, “Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight,” *Indoor Built Environ.*, vol. 23, no. 1, pp. 70–80, 2014.
- [111] J. Gagne and M. Andersen, “A generative facade design method based on daylighting performance goals,” *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 5, no. 3, pp. 141–154, May 2012.
- [112] J. M. L. Gange and M. Andersen, “Multi-Objective Optimization for Daylighting Design Using a Genetic Algorithm,” *Natl. Conf. IBPSA USA SimBuild*, vol. 9, 2010.
- [113] J. W. Lee, H. J. Jung, J. Y. Park, J. B. Lee, and Y. Yoon, “Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements,” *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 522–531, Feb. 2013.
- [114] M. Ferrara, E. Fabrizio, J. Virgone, and M. Filippi, “A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings,” *Energy Build.*, vol. 84, pp. 442–457, Dec. 2014.
- [115] J. A. Wright, A. Brownlee, M. M. Mourshed, and M. Wang, “Multi-objective optimization of cellular fenestration by an evolutionary algorithm,” *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 7, no. 1, pp. 33–51, Jan. 2014.

- [116] L. Ghobad, W. Place, and S. Cho, “Design optimization of square skylights in office buildings,” *Proc. BS 2013 13th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc.*, vol. 1, pp. 3653–3660, 2013.
- [117] I. Acosta, J. Navarro, and J. J. Sendra, “Daylighting design with lightscoop skylights: Towards an optimization of shape under overcast sky conditions,” *Energy Build.*, vol. 60, pp. 232–238, May 2013.
- [118] B. J. Futrell, E. C. Ozelkan, and D. Brentrup, “Optimizing complex building design for annual daylighting performance and evaluation of optimization algorithms,” *Energy Build.*, vol. 92, pp. 234–245, Apr. 2015.
- [119] M. Wetter and E. Polak, “Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations,” *Energy Build.*, vol. 37, no. 6, pp. 603–612, 2005.
- [120] S. L. Torres and Y. Sakamoto, “Facade design optimization for daylight with a simple genetic algorithm,” *IBPSA 2007 - Int. Build. Perform. Simul. Assoc. 2007*, pp. 1162–1167, 2007.
- [121] M. Andersen, S. Kleindienst, L. Yi, J. Lee, M. Bodart, and B. Cutler, “An intuitive daylighting performance analysis and optimization approach,” *Build. Res. Inf.*, vol. 36, no. 6, pp. 593–607, Dec. 2008.
- [122] M. Manzan, “Genetic optimization of external fixed shading devices,” *Energy Build.*, vol. 72, pp. 431–440, Apr. 2014.
- [123] M. Manzan and R. Padovan, “Multi-criteria energy and daylighting optimization for an office with fixed and moveable shading devices,” *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 238–252, Jul. 2015.
- [124] C. E. Ochoa, M. B. C. Aries, E. J. van Loenen, and J. L. M. Hensen, “Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort,” *Appl. Energy*, vol. 95, pp. 238–245, Jul. 2012.
- [125] G. Rapone and O. Saro, “Optimisation of curtain wall façades for office buildings by means of PSO algorithm,” *Energy Build.*, vol. 45, pp. 189–196, Feb. 2012.
- [126] K. Le, R. Bourdais, and H. Guéguen, “From hybrid model predictive control to logical control for shading system: A support vector machine approach,” *Energy Build.*, vol. 84, pp. 352–359, Dec. 2014.
- [127] C.-S. Park, G. Augenbroe, N. Sadegh, M. Thitisawat, and T. Messadi, “Real-time optimization of a double-skin façade based on lumped modeling and occupant preference,” *Build. Environ.*, vol. 39, no. 8, pp. 939–948, Aug. 2004.
- [128] L. Zhou and F. Haghighat, “Optimization of ventilation system design and operation in office environment, Part I: Methodology,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 4, pp. 651–656, Apr. 2009.
- [129] J. H. Lee, “Optimization of indoor climate conditioning with passive and active methods using GA and CFD,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 9, pp. 3333–3340, Sep. 2007.
- [130] G. M. Stavrakakis, P. L. Zervas, H. Sarimveis, and N. C. Markatos, “Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings,” *Appl. Math. Model.*, vol. 36, no. 1, pp. 193–211, 2012.
- [131] Biao Sun, P. B. Luh, Qing-Shan Jia, Ziyang Jiang, Fulin Wang, and Chen Song, “An integrated control of shading blinds, natural ventilation, and HVAC systems for energy saving and human comfort,” in *2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2010.
- [132] A. T. Nguyen and S. Reiter, “Passive designs and strategies for low-cost housing using simulation-based optimization and different thermal comfort criteria,” *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 7, no. 1, pp. 68–81, Jan. 2014.
- [133] L. Stephan, A. Bastide, E. Wurtz, and B. Souyri, “Ensuring desired natural ventilation rate by means of optimized openings,” *IBPSA 2009 - Int. Build. Perform. Simul. Assoc. 2009*, no. 0, pp. 2282–2288, 2009.
- [134] B. Favre and B. Peuportier, “Using dynamic programming optimization to maintain comfort in building during summer periods,” *Smart Innov. Syst. Technol.*, vol. 22, pp. 137–146, 2013.

- [135] A. Rackes and M. S. Waring, “Using multiobjective optimizations to discover dynamic building ventilation strategies that can improve indoor air quality and reduce energy use,” *Energy Build.*, vol. 75, pp. 272–280, Jun. 2014.
- [136] S. M. Bambrook, A. B. Sproul, and D. Jacob, “Design optimisation for a low energy home in Sydney,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 7, pp. 1702–1711, Jul. 2011.
- [137] S. Salminen Palonen, “Combined Energy Simulation and Multi-criteria Optimisation of a Leed-certified Building,” 2012.
- [138] C. Zhou, Z. Wang, Q. Chen, Y. Jiang, and J. Pei, “Design optimization and field demonstration of natural ventilation for high-rise residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 82, pp. 457–465, Oct. 2014.
- [139] C. Baglivo, D. Mazzeo, G. Oliveti, and P. M. Congedo, “Technical data of a grid-connected photovoltaic/wind hybrid system with and without storage battery for residential buildings located in a warm area,” *Data Br.*, vol. 20, pp. 587–590, 2018.
- [140] X. Li and A. Malkawi, “Multi-objective optimization for thermal mass model predictive control in small and medium size commercial buildings under summer weather conditions,” *Energy*, vol. 112, pp. 1194–1206, Oct. 2016.
- [141] H. Huang, S. Kato, and R. Hu, “Optimum design for indoor humidity by coupling Genetic Algorithm with transient simulation based on Contribution Ratio of Indoor Humidity and Climate analysis,” *Energy Build.*, vol. 47, pp. 208–216, Apr. 2012.
- [142] L. Y. Maystre and D. Bollinger, *Aide à la négociation multicritère : Pratique et conseils*, P.P.e.U. R. Collection : gérer l’environnement, 1998.
- [143] IFEN, *Aménagement du territoire et environnement : politiques et indicateurs*. 2000.
- [144] P. Moura, “Méthode d’évaluation des performances des systèmes d’infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain,” *Génie Civ.*, p. 349, 2008.
- [145] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, and J. H. Zhao, “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2263–2278, Dec. 2009.
- [146] D. Kolokotsa, C. Diakaki, E. Grigoroudis, G. Stavrakakis, and K. Kalaitzakis, “Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings,” *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 121–146, Jan. 2009.
- [147] E. Rey, “Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue,” *Energy Build.*, vol. 36, no. 4, pp. 367–372, Apr. 2004.
- [148] Y. Zhu, “Applying computer-based simulation to energy auditing: A case study,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 5, pp. 421–428, May 2006.
- [149] CSTB, *Réglementation thermique : Règle Th-U*. 2005.
- [150] N. A. D’Cruz and A. D. Radford, “A multicriteria model for building performance and design,” *Build. Environ.*, vol. 22, no. 3, pp. 167–179, Jan. 1987.
- [151] N. Bouchlaghem, “Optimising the design of building envelopes for thermal performance,” *Autom. Constr.*, vol. 10, no. 1, pp. 101–112, Nov. 2000.
- [152] ISO13790, “Energy performance of buildings—Calculation of energy use for space heating and cooling,” *Eur. Comm. Stand. (CEN), Brussels*, vol. 1, no. 1, p. 140, 2006.
- [153] M. S. Al-Homoud, “Optimum thermal design of office buildings,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 21, no. 10, pp. 941–957, Aug. 1997.
- [154] M. Wetter, “GenOpt - A Generic Optimization Program,” *Seventh Int. IBPSA Conf.*, no. August, pp. 601–608, 2001.
- [155] D. A. Coley and S. Schukat, “Low-energy design: combining computer-based optimisation and human judgement,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 12, pp. 1241–1247, Dec. 2002.
- [156] Z. Chen, D. Clements-Croome, J. Hong, H. Li, and Q. Xu, “A multicriteria lifespan energy efficiency approach to intelligent building assessment,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 5, pp. 393–409, May 2006.

- [157] A. K. Gholap and J. A. Khan, “Design and multi-objective optimization of heat exchangers for refrigerators,” *Appl. Energy*, vol. 84, no. 12, pp. 1226–1239, Dec. 2007.
- [158] F. Pernodet Chanterelle, “Méthode d’optimisation multicritère de scénarios de réhabilitation de bâtiments tertiaires : Application à l’évaluation de dispositifs de rafraîchissement hybride,” 2010.
- [159] K. Alanne, “Selection of renovation actions using multi-criteria ‘knapsack’ model,” *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 3, pp. 377–391, May 2004.
- [160] K. Alanne, A. Salo, A. Saari, and S.-I. Gustafsson, “Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems,” *Energy Build.*, vol. 39, no. 12, pp. 1218–1226, Dec. 2007.
- [161] W. Wang, R. Zmeureanu, and H. Rivard, “Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 11, pp. 1512–1525, Nov. 2005.
- [162] B. Peuportier, *Deliverable D5 : final technical report including monitoring results and analysis*. Site 4 La Noue: REGEN-LINK, 2004.
- [163] M. Moran, *Availability analysis: a guide to efficient energy use*, NJ: Prenti. Englewood Cliffs, 1982.
- [164] Y. Rosenfeld and I. M. Shohet, “Decision support model for semi-automated selection of renovation alternatives,” *Autom. Constr.*, vol. 8, no. 4, pp. 503–510, Apr. 1999.
- [165] T. Lindström and L. Johansson, “Energy efficiency first : The foundation of a low-carbon society Digital version Project manager Technical consultant,” no. June, pp. 6–9, 2011.
- [166] V. Martinaitis, A. Rogoža, and I. Bikmaniene, “Criterion to evaluate the ‘twofold benefit’ of the renovation of buildings and their elements,” *Energy Build.*, vol. 36, no. 1, pp. 3–8, Jan. 2004.
- [167] WBCSD: World business council for sustainable development, *Transforming the Market: Energy Efficiency in Buildings report*. 2009.
- [168] B. Chabot, *La méthode TEC d’analyse économique*. ENSAM Mastere SYSER, 2005.
- [169] M. . Miles, R. L. . Haney, and G. Berens, *Real Estate Development Principles and Process*, Urban Land Institute (ULI). Washington, DC, 1996.
- [170] A. Thomsen and K. van der Flier, “Replacement or renovation of dwellings: the relevance of a more sustainable approach,” *Build. Res. Inf.*, vol. 37, no. 5–6, pp. 649–659, Nov. 2009.
- [171] Fanger P.O., *Thermal Comfort*. Danish Technical Press, 1970.
- [172] S. J. Emmerich, B. Polidoro, and J. W. Axley, “Impact of adaptive thermal comfort on climatic suitability of natural ventilation in office buildings,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, pp. 2101–2107, 2011.
- [173] J. F. Nicol, “Adaptive comfort,” *Build. Res. Inf.*, vol. 39, no. 2, pp. 105–107, Apr. 2011.
- [174] B. Chegari, M. Tabaa, F. Moutaouakkil, E. Simeu, and H. Medromi, “Energy savings and thermal comfort benefits of shading devices,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Smart City Applications*, 2019, pp. 1–8.
- [175] European Standard, “UNE-EN 15251:2008. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics,” *Aenor*, vol. 3, pp. 1–52, 2008.
- [176] AFNOR, *Ergonomie - Principes d’ergonomie visuelle applicables à l’éclairage des lieux de travail*. NF X35-103, 1990.
- [177] A. Barrier and A. Gilgen, *Natürliche Belichtung von Wohnungen*. Cités par E. Grandjean (12) Zürich : Institutes für Orts-, Regional- und Landesplanung, 1970.
- [178] A. D. Radford and J. S. Gero, “Tradeoff diagrams for the integrated design of the physical environment in buildings,” *Build. Environ.*, vol. 15, no. 1, pp. 3–15, Jan. 1980.
- [179] B. Paule, F. Bouvier, and G. Courret, *Techniques de l’ingénieur : Éclairage naturel*, C3315 ed. 2008.
- [180] R. Becker, I. Goldberger, and M. Paciuk, “Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 9, pp. 3261–3276, Sep. 2007.

- [181] B. Peuportier, “Eco-conception des bâtiments et des quartiers: bâtir en préservant l’environnement,” Presses de l’Ecole des Mines ParisTech, 2008.
- [182] E. Rutman, C. Inard, A. Bailly, and F. Allard, “A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 1, pp. 29–37, Jan. 2005.
- [183] D. Kolokotsa, D. Tsiavos, G. S. Stavrakakis, K. Kalaitzakis, and E. Antonidakis, “Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings’ occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction,” *Energy Build.*, vol. 33, no. 6, pp. 531–543, 2001.
- [184] H. Doukas, K. D. Patlitzianas, K. Iatropoulos, and J. Psarras, “Intelligent building energy management system using rule sets,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 10, pp. 3562–3569, Oct. 2007.
- [185] P. Blondeau, M. Spérandio, and F. Allard, “Multicriteria analysis of ventilation in summer period,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 2, pp. 165–176, Feb. 2002.
- [186] J. K. W. Wong and H. Li, “Application of the analytic hierarchy process (AHP) in multi-criteria analysis of the selection of intelligent building systems,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 1, pp. 108–125, Jan. 2008.
- [187] J. Gibberd, *Ecological Footprint (EF) and Human Development Index (HDI) capability for sustainable development trajectories*. Sao Paulo: In proceedings from the Smart and Sustainable Built Environment International Conference, 2012.
- [188] N. Delgarm, B. Sajadi, F. Kowsary, and S. Delgarm, “Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO),” *Appl. Energy*, vol. 170, pp. 293–303, May 2016.
- [189] N. Delgarm, B. Sajadi, S. Delgarm, and F. Kowsary, “A novel approach for the simulation-based optimization of the buildings energy consumption using NSGA-II: Case study in Iran,” *Energy Build.*, vol. 127, pp. 552–560, Sep. 2016.
- [190] K. Li, L. Pan, W. Xue, H. Jiang, and H. Mao, “Multi-Objective Optimization for Energy Performance Improvement of Residential Buildings: A Comparative Study,” *Energies*, vol. 10, no. 2, p. 245, Feb. 2017.
- [191] E. Asadi, M. G. da Silva, C. H. Antunes, and L. Dias, “A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB,” *Build. Environ.*, vol. 56, pp. 370–378, 2012.
- [192] V. Baudoui, “Optimisation robuste multiobjectifs par modèles de substitution,” [Http://Www.Theses.Fr](http://www.theses.fr), 2012.
- [193] E. Anderson *et al.*, *LAPACK Users’ guide*, 3rd ed. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999.
- [194] G. Dreyfus *et al.*, *Réseaux de neurones : méthodologies et applications*. Eyrolles, 2004.
- [195] G. Cybenko, *Approximation by superpositions of a sigmoidal function*, 2(4):303–3. Mathematics of Control, Signals, and Systems (MCSS), 1989.
- [196] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, *Multilayer feedforward networks are universal approximators*, 2(5):359–. Neural Networks, 1989.
- [197] K. Funahashi, *On the approximate realization of continuous mappings by neural networks*, 2(3):183–1. Neural Networks, 1989.
- [198] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, *Learning representations by back propagating errors*, 323(6088): Nature, 1986.
- [199] D. G. Krige, *A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand*, OR, 4(1). 1953.
- [200] G. Matheron, “Principles of geostatistics,” vol. 58, 1963.
- [201] D. S. Broomhead and D. Lowe, *Radial Basis Functions, Multi Variable Functional Interpolation and Adaptive Networks*, 2:321– 355. Complex Systems, 1988.
- [202] V. Vladimir, *The nature of statistical learning*. Springer, 2000.
- [203] D. Levin, *The Approximation Power of Moving Least-Squares*, 67:1517–15. Mathematics of Computation, 1998.

- [204] J. H. Friedman, *Multivariate Adaptive Regression Splines*, 19(1):1–67. The Annals of Statistics, 1991.
- [205] J. P. C. Kleijnen and R. G. Sargent, “A methodology for fitting and validating metamodels in simulation|Two anonymous referees’ comments on the first draft lead to an improved organization of our paper.1,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 120, no. 1, pp. 14–29, Jan. 2000.
- [206] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference and Prediction*, 2nd ed. Springer Series in Statistics, 2009.
- [207] S. Wright, “Correlation and causation,” *J. Agric. Res.*, vol. 20(3), pp. 557–585, 1921.
- [208] A. de Myttenaere, B. Golden, B. Le Grand, and F. Rossi, “Mean Absolute Percentage Error for regression models,” *Neurocomputing*, vol. 192, pp. 38–48, Jun. 2016.
- [209] J. S. Armstrong and F. Collopy, “Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons,” *Int. J. Forecast.*, vol. 8, no. 1, pp. 69–80, Jun. 1992.
- [210] A. JS, *Long-range forecasting: from crystal ball to computer*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1985.
- [211] B. E. Flores, “A pragmatic view of accuracy measurement in forecasting,” *Omega*, vol. 14, no. 2, pp. 93–98, Jan. 1986.
- [212] S. Makridakis, “Accuracy measures: theoretical and practical concerns,” *Int. J. Forecast.*, vol. 9, no. 4, pp. 527–529, Dec. 1993.
- [213] R. J. Hyndman, “Errors on percentage errors,” 2014. [Online]. Available: <https://robjhyndman.com/hyndsight/smape/>. [Accessed: 15-Mar-2022].
- [214] M. B. Editor, “Regression analysis: how do I interpret R-squared and assess the goodness-of-fit?,” 2013. [Online]. Available: <https://blog.minitab.com/en/adventures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the-goodness-of-fit>. [Accessed: 15-Mar-2022].
- [215] W. C. Carpenter, “Comparison of polynomial approximations and artificial neural nets for response surfaces in engineering optimization,” 1991, 5(3):166–1.
- [216] A. A. Giunta and L. T. Watson, “A comparison of approximation modeling techniques: Polynomial versus interpolating models,” *7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symp. Multidiscip. Anal. Optim.*, pp. 392–404, 1998.
- [217] T. W. Simpson, J. D. Poplinski, P. N. Koch, and J. K. Allen, “Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations,” *Eng. Comput.*, vol. 17, no. 2, pp. 129–150, Jul. 2001.
- [218] R. Jin, W. Chen, and T. W. Simpson, “Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–13, Dec. 2001.
- [219] A. Berro, “Optimisation multiobjectifs et stratégies d’évolution en environnement dynamique,” Universit des Sciences Sociales Toulouse, 2001.
- [220] Y. COLLETTE and P. SIARRY, *Optimisation multiobjectif: Algorithmes*, Eyrolles. 2011.
- [221] J. A. Nelder and R. Mead, “A Simplex Method for Function Minimization,” *Comput. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 308–313, Jan. 1965.
- [222] W. Spendley, G. R. Hext, and F. R. Himsforth, “Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation,” *Technometrics*, vol. 4, no. 4, pp. 441–461, Nov. 1962.
- [223] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. 1989.
- [224] J. D. Schaffer, “Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms*, 1985, pp. 90–100.
- [225] V. Pareto, *Cours d’ conomie politique*, vol. 1 & 2. Lausanne, 1896.
- [226] F. Jiménez and J. L. Verdegay, “Constrained Multiobjective Optimization by Evolutionary Algorithms,” in *Proceedings of International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems (EIS’98)*, 1998, pp. 266–271.

- [227] K. Deb, A. Pratap, and T. Meyarivan, “Constrained Test Problems for Multi-objective Evolutionary Optimization,” 2001, pp. 284–298.
- [228] K. A. DeJong, *Are genetic algorithms function optimizers?* Actes de PPSN 2, 1992.
- [229] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. The MIT Press, 1975.
- [230] L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J. Walsh, *Artificial intelligence through simulated evolution*. 1966.
- [231] I. Rechenberg, *Cybernetic solution path of an experimental problem*, 1122nd ed. Farnborough: Royal Aircraft Establishment.
- [232] J. R. Koza, *Genetic Programming, on the programming of computers by means of natural selection*. The MIT Press, 1992.
- [233] M. W. Ahmad, M. Mourshed, B. Yuce, and Y. Rezgui, “Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review,” *Build. Simul.*, vol. 9, no. 4, pp. 359–398, Aug. 2016.
- [234] A. El Dor, “Perfectionnement des algorithmes d’optimisation par essaim particulaire: applications en segmentation d’images et en électronique,” Université Paris-Est, 2012.
- [235] P. Marin, *Eco Conception Générative*. Paris: Agence Nationale de la Recherche, 2013.
- [236] S. Rainer and P. Kenneth, “Differential Evolution: A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces,” *J. Glob. Optim.*, vol. 11, no. 4, p. 341, 1997.
- [237] H. Mühlenbein and G. Paass, “From recombination of genes to the estimation of distributions I. Binary parameters,” 1996, pp. 178–187.
- [238] C. R. Darwin, *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. 1859.
- [239] P. T. Vermeulen, “Thèse présentée pour l’obtention du grade de Docteur de l’UTC Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire,” 2014.
- [240] R. Clément, “Méthode d’optimisation multicritère pour l’aide à la conception des projets de densification urbaine,” 2017.
- [241] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Applied Mathematics in Science, 2001.
- [242] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, Apr. 2002.
- [243] K. Deb and K. Deb, “Multi-objective Optimization,” in *Search Methodologies*, E. K. Burke and G. Kendall, Eds. Boston, MA: Springer US, 2014, pp. 403–449.
- [244] S. P. Kodali, R. Kudikala, and D. Kalyanmoy, “Multi-Objective Optimization of Surface Grinding Process Using NSGA II,” in *2008 First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 2008, pp. 763–767.
- [245] J. Chen, “Multi-Objective Optimization of Cutting Parameters with Improved NSGA-II,” in *2009 International Conference on Management and Service Science*, 2009, pp. 1–4.
- [246] K. Deb and R. B. Agrawal, “Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space,” *Complex Syst.*, vol. 9, pp. 1–34, 1994.
- [247] K. Deb and M. Goyal, “A combined genetic adaptive search (GeneAS) for engineering design,” *Comput. Sci. Informatics*, vol. 26, pp. 30–45, 1996.
- [248] A. Oyama, K. Shimoyama, and K. Fujii, “NEW CONSTRAINT-HANDLING METHOD FOR MULTI-OBJECTIVE MULTI-CONSTRAINT EVOLUTIONARY OPTIMIZATION AND ITS APPLICATION TO SPACE PLANE DESIGN,” pp. 1–13, 2005.
- [249] E. C. Laskari, K. E. Parsopoulos, and M. N. Vrahatis, “Particle swarm optimization for integer programming,” *Proc. 2002 Congr. Evol. Comput. CEC 2002*, vol. 2, pp. 1582–1587, 2002.
- [250] J. E. Fieldsend, R. M. Everson, and S. Singh, “Using unconstrained elite archives for multiobjective optimization,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 7, no. 3, pp. 305–323, 2003.
- [251] C. A. Coello Coello and M. Reyes-Sierra, “Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A

- Survey of the State-of-the-Art,” *Int. J. Comput. Intell. Res.*, vol. 2, no. 3, 2006.
- [252] J. E. Alvarez-Benitez, R. M. Everson, and J. E. Fieldsend, “A MOPSO algorithm based exclusively on pareto dominance concepts,” *Lect. Notes Comput. Sci.*, vol. 3410, pp. 459–473, 2005.
- [253] J. E. Fieldsend and S. Singh, “A Multi-Objective Algorithm based upon Particle Swarm Optimisation, an Efficient Data Structure and Turbulence,” in *Proceeding of the 2002 U.K. Workshop on Computational Intelligence*, 2002, pp. 37–44.
- [254] S. Mostaghim and J. Teich, “Strategies for finding good local guides in multi-objective particle swarm optimization (MOPSO),” in *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS’03 (Cat. No.03EX706)*, 2003, vol. 2, no. 5, pp. 26–33.
- [255] F. W. Glover, *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence*, 13(5). Computers and Operations Research, 1986.
- [256] F. Kheiri, “A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. April, pp. 897–920, 2018.
- [257] X. Gandibleux, D. Vancoppenolle, and D. Tuytens, *A first making use of GRASP for solving MOCO problems*, Technical. Charlottesville: Paper presented at MCDM 14, 1998.
- [258] A. Laurent, P. A., and T. P., “A Path Relinking Algorithm for the Generalized Assignment Problem,” in *Metaheuristics Computer Decision-making*, 1st ed., Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 1–17.
- [259] Q. Y. Duan, V. K. Gupta, and S. Sorooshian, “Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization,” *J. Optim. Theory Appl.*, vol. 76, no. 3, pp. 501–521, Mar. 1993.
- [260] P. Westermann and R. Evins, “Surrogate modelling for sustainable building design – A review,” *Energy Build.*, vol. 198, pp. 170–186, 2019.
- [261] Y. Cui, Z. Geng, Q. Zhu, and Y. Han, “Review: Multi-objective optimization methods and application in energy saving,” *Energy*, vol. 125, pp. 681–704, 2017.
- [262] M. Wei *et al.*, “Approaches to Cost-Effective Near-Net Zero Energy New Homes with Time-of-Use Value of Energy and Battery Storage,” *Adv. Appl. Energy*, vol. 2, no. March, p. 100018, 2021.
- [263] F. Bano and V. Sehgal, “Finding the gaps and methodology of passive features of building envelope optimization and its requirement for office buildings in India,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 9, no. September 2018, pp. 66–93, 2019.
- [264] S. Li, L. Liu, and C. Peng, “A review of performance-oriented architectural design and optimization in the context of sustainability: Dividends and challenges,” *Sustain.*, vol. 12, no. 4, p. 1427, Feb. 2020.
- [265] P. de Wilde, *Building Performance Analysis*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2018.
- [266] Z. Tian, X. Zhang, X. Jin, X. Zhou, B. Si, and X. Shi, “Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review,” *Energy Build.*, vol. 158, pp. 1306–1316, Jan. 2018.
- [267] L. De Boeck, S. Verbeke, A. Audenaert, and L. De Mesmaeker, “Improving the energy performance of residential buildings: A literature review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 960–975, Dec. 2015.
- [268] B. Chegari, M. Tabaa, F. Moutaouakkil, E. Simeu, and H. Medroumi, “The impact of the thermos-physical parameters of insulation on the energy performance of a building in Morocco,” in *2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE)*, 2019, pp. 1–6.
- [269] B. Chegari, M. Tabaa, F. Moutaouakkil, E. Simeu, and H. Medromi, “Local energy self-sufficiency for passive buildings: Case study of a typical Moroccan building,” *J. Build. Eng.*, vol. 29, no. December 2019, p. 101164, May 2020.
- [270] Autodesk, “AutoCAD For Mac & Windows | CAD Software.” [Online]. Available:

- <https://www.autodesk.eu/products/autocad/overview>. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [271] SketchUp, “SketchUp Pro Software | Create 3D Model Online.” [Online]. Available: <https://www.sketchup.com/products/sketchup-pro>. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [272] S.A KLEIN et al., *TRNSYS: A Transient System Simulation Program*. In : . Madison, USA : Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. 2010 - CSTB. 2010.
- [273] S.A KLEIN et al., *Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild - CSTB*, vol. 6. 2007.
- [274] CSTB, “Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.” [Online]. Available: <http://www.cstb.fr/fr/>. [Accessed: 31-May-2019].
- [275] ASHRAE, *American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers*. 2007.
- [276] AMEE, “Bibliothèque BINAYAT perspective 2014.” .
- [277] Energie+, “Les charges thermiques internes pour les bureaux.” [Online]. Available: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11245#>. [Accessed: 17-Apr-2019].
- [278] “Meteonorm Global Meteorological databas Version 7.” [Online]. Available: <https://meteonorm.com/download>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [279] J. S. Chou and D. K. Bui, “Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design,” *Energy Build.*, vol. 82, no. 2014, pp. 437–446, 2014.
- [280] G. S. Georgiou, P. Christodoulides, and S. A. Kalogirou, “Implementing artificial neural networks in energy building applications - A review,” in *2018 IEEE International Energy Conference, ENERGYCON 2018*, 2018, pp. 1–6.
- [281] D. Guyot, F. Giraud, F. Simon, D. Corgier, C. Marvillet, and B. Tremeac, “Overview of the use of artificial neural networks for energy-related applications in the building sector,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 13, p. er.4706, Jul. 2019.
- [282] S. Pandey, D. A. Hindoliya, and R. Mod, “Artificial neural network for predation of cooling load reduction using green roof over building in sustainable city,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 3, no. 1, pp. 37–45, Jul. 2012.
- [283] A. S. Jihad and M. Tahiri, “Forecasting the heating and cooling load of residential buildings by using a learning algorithm ‘gradient descent’, Morocco,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 12, no. February, pp. 85–93, Sep. 2018.
- [284] Y. Lin, S. Zhou, W. Yang, L. Shi, and C. Q. Li, “Development of building thermal load and discomfort degree hour prediction models using data mining approaches,” *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1570, Jun. 2018.
- [285] B. Chegari, M. Tabaa, E. Simeu, F. Moutaouakkil, and H. Medromi, “Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort by combining artificial neural networks and metaheuristic algorithms,” *Energy Build.*, vol. 239, p. 110839, May 2021.
- [286] B. Chegari, M. Tabaa, E. Simeu, F. Moutaouakkil, and H. Medromi, “An optimal surrogate-model-based approach to support comfortable and nearly zero energy buildings design,” *Energy*, vol. 248, p. 123584, Jun. 2022.
- [287] M. A. Shahin, H. R. Maier, and M. B. Jaksa, “Data division for developing neural networks applied to geotechnical engineering,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 105–114, 2004.
- [288] N. D. Roman, F. Bre, V. D. Fachinotti, and R. Lamberts, “Application and characterization of metamodels based on artificial neural networks for building performance simulation: A systematic review,” *Energy Build.*, vol. 217, p. 109972, Jun. 2020.
- [289] B. Wierenga and J. Kluytmans, “Neural nets versus marketing models in time series analysis: A simulation study,” *Marketing: Its Dynamics and Challenges*. EMAC, pp. 1139–1153, 1994.
- [290] V. Venugopal and W. Baets, “Neural networks and statistical techniques in marketing research,” *Mark. Intell. Plan.*, 1994.
- [291] V. Venugopal and W. Baets, “Neural networks & their applications in marketing management,” *J. Syst. Manag.*, vol. 45, no. 9, p. 16, 1994.
- [292] D. Shepard, R. Batra, A. Deutsch, G. Orme, and B. Ratner, *The new direct marketing How to implement a profit-driven database marketing strategy*. Business One Irwin, 1990.

- [293] A. Keshtkarbanaemoghadam, A. Dehghanbanadaki, and M. Hadi, “Estimation and optimization of heating energy demand of a mountain shelter by soft computing techniques,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, no. January, pp. 728–748, 2018.
- [294] G. D. Garson, “Interpreting neural-network connection weights,” *Artif. Intell. Expert*, vol. 6(7), pp. 47–51.
- [295] G. Calleja, A. Carrillo, F. Domínguez, J. Manuel, C. López, and Y. Zhang, “Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters,” vol. 67, pp. 79–87, 2013.
- [296] T. C. N. De Souza, E. F. G. Goldberg, and M. C. Goldberg, “Comparing PSO and NSGA II for the biobjective Oil Derivatives Distribution Problem,” *2010 IEEE World Congr. Comput. Intell. WCCI 2010 - 2010 IEEE Congr. Evol. Comput. CEC 2010*, 2010.
- [297] Z. Anwar and A. Ahsan, “Comparative Analysis of MOGA, NSGA-II and MOPSO for Regression Test Suite Optimization,” *Int. J. Softw. Eng. (IJSE)* 7, vol. 7, no. 1, pp. 41–56, 2014.
- [298] V. Babaveisi, M. M. Paydar, and A. S. Safaei, “Optimizing a multi-product closed-loop supply chain using NSGA-II, MOSA, and MOPSO meta-heuristic algorithms,” *J. Ind. Eng. Int.*, vol. 14, no. 2, pp. 305–326, 2018.
- [299] H. Isibushi, T. Isibushi, “T. Murata and H. Ishibuchi, ‘MOGA: Multi-objective genetic algorithms,’” *IEEE*, no. November, pp. 289–294, 1995.
- [300] C. A. Coello Coello and M. S. Lechuga, “MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization,” in *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC’02 (Cat. No.02TH8600)*, 2002, vol. 2, pp. 1051–1056.
- [301] M. Hamdy, A.-T. Nguyen, and J. L. M. Hensen, “A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems,” *Energy Build.*, vol. 121, pp. 57–71, Jun. 2016.
- [302] B. Si, J. Wang, X. Yao, X. Shi, X. Jin, and X. Zhou, “Multi-objective optimization design of a complex building based on an artificial neural network and performance evaluation of algorithms,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 40, no. November 2018, pp. 93–109, Apr. 2019.
- [303] T. SOLAR, “Polycrystalline A grade solar module,” 2019.
- [304] “Eolienne Kingspan Wind - éolienne domestique Kingspan Wind.” [Online]. Available: <http://www.capenergie.fr/catalogue/eolienne/eolienne-kingspan-wind.html>. [Accessed: 22-Mar-2019].
- [305] “Batterie solaire GEL 250Ah 12V Ultracell.” [Online]. Available: <https://www.ase-energy.com/batterie-solaire-gel-250ah-12v-ultracell,fr,4,BATUCG250A.cfm>. [Accessed: 05-Apr-2019].
- [306] “Régulateur MPPT Victron SmartSolar 75/10-15 & 100/15-20.” [Online]. Available: <https://www.wattneed.com/fr/controlleurs-de-charge/4188-regulateur-mppt-victron-smartsolar-7510-15-10015-20-0712971136236.html>. [Accessed: 25-Mar-2019].
- [307] N. America, “Converter DC/DC 350DNC40-24-xG,” 2015.
- [308] “China 4-Digit LED Display Precision 10KW Programmable DV Power Supply - China Power Supply, DC Regulated Power Supply.” [Online]. Available: <https://zjguanyou.en.made-in-china.com/product/rKsxDpajYgpH/China-4-Digit-LED-Display-Precision-10KW-Programmable-DV-Power-Supply.html>. [Accessed: 05-Apr-2019].
- [309] “Growatt 3 Phase Grid Tie 500kw Solar Inverter 10kw 20kw 30kw 40kw 50kw Solar Inverter,” 2017. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Growatt-grid-tie-inverter-10kw-20kw_60620827475.html?spm=a2700.9099375.35.9.7fbd62f9q63LX9. [Accessed: 25-Mar-2019].
- [310] AMEE-E, *Manuel technique de l’éclairage*. 2015.
- [311] F. Bre, N. Roman, and V. D. Fachinotti, “An efficient metamodel-based method to carry out multi-objective building performance optimizations,” *Energy Build.*, vol. 206, p. 109576, Jan. 2020.

- [312] Y. Zhai, Y. Wang, Y. Huang, and X. Meng, “A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance,” *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 1190–1199, Apr. 2019.
- [313] L. Shi, H. Zhang, Z. Li, Z. Luo, and J. Liu, “Optimizing the thermal performance of building envelopes for energy saving in underground office buildings in various climates of China,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 77, no. 66, pp. 26–35, Jul. 2018.
- [314] S. Papadopoulos and W. L. Woon, *Data Analytics for Renewable Energy Integration. Technologies, Systems and Society*, vol. 49–62, 63-. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [315] R. Yao, V. Costanzo, X. Li, Q. Zhang, and B. Li, “The effect of passive measures on thermal comfort and energy conservation. A case study of the hot summer and cold winter climate in the Yangtze River region,” *J. Build. Eng.*, vol. 15, no. June 2017, pp. 298–310, Jan. 2018.
- [316] K. Bamdad, M. E. Cholette, L. Guan, and J. Bell, “Building energy optimisation under uncertainty using ACOMV algorithm,” *Energy Build.*, vol. 167, pp. 322–333, May 2018.
- [317] S. Gou, V. M. Nik, J. L. Scartezzini, Q. Zhao, and Z. Li, “Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand,” *Energy Build.*, vol. 169, pp. 484–506, 2018.
- [318] E. Mostavi, S. Asadi, and D. Boussaa, “Development of a new methodology to optimize building life cycle cost, environmental impacts, and occupant satisfaction,” *Energy*, vol. 121, pp. 606–615, Feb. 2017.
- [319] A. Zhang, R. Bokel, A. van den Dobbelsteen, Y. Sun, Q. Huang, and Q. Zhang, “Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China,” *Energy Build.*, vol. 139, pp. 371–384, Mar. 2017.
- [320] F. Bre and V. D. Fachinotti, “A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings,” *Energy Build.*, vol. 154, pp. 283–294, Nov. 2017.
- [321] N. Harmathy, Z. Magyar, and R. Folić, “Multi-criterion optimization of building envelope in the function of indoor illumination quality towards overall energy performance improvement,” *Energy*, vol. 114, pp. 302–317, Nov. 2016.
- [322] R. Azari, S. Garshasbi, P. Amini, H. Rashed-Ali, and Y. Mohammadi, “Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance,” *Energy Build.*, vol. 126, pp. 524–534, Aug. 2016.
- [323] N. C. Brown and C. T. Mueller, “Design for structural and energy performance of long span buildings using geometric multi-objective optimization,” *Energy Build.*, vol. 127, pp. 748–761, Sep. 2016.
- [324] T. Méndez Echenagucia, A. Capozzoli, Y. Cascone, and M. Sassone, “The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis,” *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 577–591, Sep. 2015.
- [325] Z. Romani, A. Draoui, and F. Allard, “Metamodeling the heating and cooling energy needs and simultaneous building envelope optimization for low energy building design in Morocco,” *Energy Build.*, vol. 102, pp. 139–148, 2015.
- [326] W. Yu, B. Li, H. Jia, M. Zhang, and D. Wang, “Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design,” *Energy Build.*, vol. 88, pp. 135–143, Feb. 2015.
- [327] C. Yang *et al.*, “High throughput computing based distributed genetic algorithm for building energy consumption optimization,” *Energy Build.*, vol. 76, pp. 92–101, Jun. 2014.
- [328] K. Bamdad, M. E. Cholette, and J. Bell, “Building energy optimization using surrogate model and active sampling,” *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 13, no. 6, pp. 760–776, 2020.
- [329] D. Gonçalves, Y. Sheikhnejad, M. Oliveira, and N. Martins, “One step forward toward smart city Utopia: Smart building energy management based on adaptive surrogate modelling,” *Energy Build.*, vol. 223, 2020.

- [330] T. Wortmann, “Genetic evolution vs. function approximation: Benchmarking algorithms for architectural design optimization,” *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 414–428, 2019.
- [331] X. Chen and H. Yang, “Integrated energy performance optimization of a passively designed high-rise residential building in different climatic zones of China,” *Appl. Energy*, vol. 215, no. February, pp. 145–158, 2018.
- [332] A. Prada, A. Gasparella, and P. Baggio, “On the performance of meta-models in building design optimization,” *Appl. Energy*, vol. 225, no. February, pp. 814–826, 2018.
- [333] S. Nagpal, C. Mueller, A. Aijazi, and C. F. Reinhart, “A methodology for auto-calibrating urban building energy models using surrogate modeling techniques,” *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–16, 2018.
- [334] L. G. Maltais and L. Gosselin, “Daylighting ‘energy and comfort’ performance in office buildings: Sensitivity analysis, metamodel and pareto front,” *J. Build. Eng.*, vol. 14, no. September, pp. 61–72, 2017.
- [335] X. Chen, H. Yang, and K. Sun, “Developing a meta-model for sensitivity analyses and prediction of building performance for passively designed high-rise residential buildings,” *Appl. Energy*, vol. 194, pp. 422–439, 2017.
- [336] J. Dhariwal and R. Banerjee, “An approach for building design optimization using design of experiments,” *Build. Simul.*, vol. 10, no. 3, pp. 323–336, 2017.
- [337] J. Carreras *et al.*, “Systematic approach for the life cycle multi-objective optimization of buildings combining objective reduction and surrogate modeling,” *Energy Build.*, vol. 130, pp. 506–518, 2016.
- [338] S. S. Gilan, N. Goyal, and B. Dilkina, “Active learning in multi-objective evolutionary algorithms for sustainable building design,” *GECCO 2016 - Proc. 2016 Genet. Evol. Comput. Conf.*, pp. 589–596, 2016.
- [339] W. Xu, A. Chong, O. T. Karaguzel, and K. P. Lam, “Improving evolutionary algorithm performance for integer type multi-objective building system design optimization,” *Energy Build.*, vol. 127, pp. 714–729, 2016.
- [340] A. E. I. Brownlee and J. A. Wright, “Constrained, mixed-integer and multi-objective optimisation of building designs by NSGA-II with fitness approximation,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 33, pp. 114–126, 2015.
- [341] E. Asadi, M. G. Da Silva, C. H. Antunes, L. Dias, and L. Glicksman, “Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application,” *Energy Build.*, vol. 81, pp. 444–456, 2014.
- [342] E. Gengembre, B. Ladevie, O. Fudym, and A. Thuillier, “A Kriging constrained efficient global optimization approach applied to low-energy building design problems,” *Inverse Probl. Sci. Eng.*, vol. 20, no. 7, pp. 1101–1114, 2012.
- [343] B. Eisenhower, Z. O’Neill, S. Narayanan, V. A. Fonoberov, and I. Mezić, “A methodology for meta-model based optimization in building energy models,” *Energy Build.*, vol. 47, pp. 292–301, 2012.
- [344] G. Zemella, D. De March, M. Borrotti, and I. Poli, “Optimised design of energy efficient building façades via Evolutionary Neural Networks,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3297–3302, 2011.
- [345] S. L. Wong, K. K. W. Wan, and T. N. T. Lam, “Artificial neural networks for energy analysis of office buildings with daylighting,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 551–557, 2010.
- [346] L. Magnier and F. Haghghat, “Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 3, pp. 739–746, 2010.

Publications scientifiques

Article dans une revue internationale :

- ✓ **An optimal surrogate-model-based approach to support comfortable and nearly zero energy buildings design**, Badr Chegari, Mohamed Tabaa, Emmanuel Simeu, Fouad Moutaouakkil, Hicham Medromi: *Energy*, vol. 248, p. 123584, Jun. 2022. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123584> (IF: 7.15; H-Index: 193)
- ✓ **Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort by combining artificial neural networks and metaheuristic algorithms**, Badr Chegari, Mohamed Tabaa, Emmanuel Simeu, Fouad Moutaouakkil, Hicham Medromi: *Energy and Buildings*, ISSN: 0378-7788, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110839> (IF: 5.84; H-Index: 184)
- ✓ **Local energy self-sufficiency for passive buildings: Case study of a typical Moroccan building**, Badr Chegari, Mohamed Tabaa, Fouad Moutaouakkil, Emmanuel Simeu, Hicham Medromi: *Journal of Building Engineering*, ISSN: 2352-7102, Volume 29, ISBN:978-1-7281-0827-8, Mai 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.101164> (IF: 5.32; H-Index: 39)

Communication dans un congrès international :

- ✓ **Towards FPGA Implementation of an Intelligent Hybrid Energy Management System**, Asmae Chakir, Badr Chegari, Mohamed Tabaa, Emmanuel Simeu: ICESA 2021: The Proceedings of the International Conference on Electrical Systems and Automation, *Springer*, Singapore, pp. 155–166, ISBN: 978-981-19-0035-8. March, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-0035-8_13
- ✓ **Towards a digital twin model for building energy management: Case of Morocco**, Abdelali Agouzoul, Mohamed Tabaa, Badr Chegari, Emmanuel Simeu, Abbas Dandache, Karim Alami: *Procedia Comput. Sci.*, vol. 184, pp. 404–410, 2021. ISSN: 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.051>

- ✓ **Energy Savings and Thermal Comfort Benefits of Shading Devices: Case Study of a Typical Moroccan Building**, Badr Chegari, Mohamed Tabaa, Fouad Moutaouakkil, Emmanuel Simeu, Hicham Medromi: SCA '19: Proceedings of the 4th International Conference on Smart City Applications, *Association for Computing Machinery*, New York, NY, United States. ISBN: 978-1-4503-6289-4. October, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1145/3368756.3369044>
- ✓ **The impact of the thermos-physical parameters of insulation on the energy performance of a building in Morocco**, Badr Chegari, Mohamed Tabaa, Fouad Moutaouakkil, Emmanuel Simeu, Hicham Medromi: ICCSRE 2019: Proceedings of 2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies, *IEEE Xplore Digital Library*. ISBN: 978-1-7281-0827-8. July, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCSRE.2019.8807480>

Chapitre de livre :

- ✓ **Glazing's Potential Energy Savings for Green Buildings**, Badr Chegari, Mohamed Tabaa, Emmanuel Simeu, Fouad Moutaouakkil, Hicham Medromi: Advances on Smart and Soft Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1399. *Springer*, Singapore, vol. 1399, Online ISBN: 978-981-16-5559-3. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5559-3_27
- ✓ **Shading Devices' Benefits on Thermal Comfort and Energy Performance of a Residential Building in Different Climates in Morocco**, Badr Chegari, Mohamed Tabaa, Fouad Moutaouakkil, Emmanuel Simeu, Hicham Medromi: Innovations in Smart Cities Applications Edition 3 , ISBN: 978-3-030-37628-4. Online ISBN: 978-3-030-37629-1, Series Print ISSN: 2523-3440, Series Online ISSN: 2523-3459. *Part of the Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure book series* (LNITI). February 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37629-1_79